



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos.*



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

*Análisis de viabilidad del uso
del modelo XBeach para la
evaluación temprana del desembarco
anfíbio en costa*

Trabajo realizado por:

Diego A. Delgado Tamariz

Dirigido:

Gabriel Díaz Hernández

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería Costera y
Portuaria**

Santander, octubre de 2019

TRABAJO FINAL DE MASTER

Índice

Resumen	i
Project Summary	iii
1. Introducción	1
1.1. ¿Qué es un desembarco anfibio?	1
1.2. Actualidad de la oceanografía operacional al servicio del desembarco	2
1.3. Adaptación de nuevas herramientas	4
2. Objetivos y tareas	5
3. Herramientas numéricas	6
3.1. Modelo XBeach	6
3.2. SWAN+SHORECIRC	8
3.3. OLUCA+COPLA	11
3.4. Montaje y uso de los modelos	14
4. Validación de la herramienta XBeach	18
4.1. Playa Duck, Carolina del Norte	18
4.2. Resultados y análisis de sensibilidad de la herramienta XBeach	24
4.3. Comparación con las otras herramientas	32
4.4. Conclusiones comparativas	40
5. Cálculo del criterio de desembarco (MSI)	44
5.1. Criterios funcionales para el desembarco anfibio	44
5.2. Resultados comparativos de MSI	46
6. Conclusiones generales y futuras líneas de trabajo	52
6.1. Conclusiones	52
6.2. Futuras líneas de trabajo	53
7. Referencias Bibliográficas	54
8. Anejo	55
8.1. ANEJO 1	55
8.2. ANEJO 2	62

ANÁLISIS DE VIABILIDAD DEL USO DEL MODELO XBEACH PARA LA EVALUACIÓN TEMPRANA DEL DESEMBARCO ANFIBIO EN COSTA

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

POR: DIEGO DELGADO TAMARIZ

DIRECTOR: GABRIEL DÍAZ HERNÁNDEZ

RESUMEN

El desembarco anfibio, también conocido como operación anfibia, se puede definir como maniobra lanzada desde el mar por fuerzas navales y fuerzas de desembarcos contra una costa. Conocer los procesos físicos presentes en la zona de rompientes de una playa es indispensable a la hora de tomar decisiones adecuadas en operaciones de desembarco anfibio. Estos son procesos físicos son: la altura de ola significativa (H_s) en rotura, el tiempo entre olas rompientes sucesivas caracterizado a través del periodo medio (T_m), ángulo relativo entre ola rompiente y la costa, tipo de rotura, velocidad de corrientes “longshore” y la presencia de viento. A lo largo del tiempo, diferentes herramientas numéricas se han desarrollado con el objetivo de describir los procesos físicos necesarios en la zona de rompientes con el fin de establecer el Modified Surf Index (MSI) índice operacional para el ejercicio de desembarco.

El objetivo del Trabajo de Fin de Máster (TFM) es explorar la posibilidad de emplear el modelo XBeach como una nueva estrategia numérica para el cálculo y cuantificación de los procesos de oleaje y corrientes de rotura en la zona de rompientes, con la idea de abrir una nueva alternativa para la cuantificación final del parámetro MSI.

Utilizando datos instrumentales correspondientes a la playa-experimento Duck en Carolina del Norte, costa este de los Estados Unidos, se ha realiza un diagnóstico general del uso futuro de la herramienta XBeach en el cálculo del parámetro MSI para el desembarco anfibio, estableciendo comentarios, recomendaciones y conclusiones con base en la calidad de las predicciones obtenidas, su eficiencia, fiabilidad general. Todo ello en comparación con otras dos herramientas numéricas, SWAN+SHORECIRC y OLUCA+COPLA, modelos de uso habitual en la literatura, que resuelven procesos análogos en la zona de rompientes en el ámbito 2DH (2D en horizontal, $[x-y]$).

Fluctuaciones cualitativas y cuantitativas en las predicciones de altura de ola significativa y las velocidades de corrientes litorales presentes en la zona de rompientes son notables dependiendo de la herramienta empleada. Con la intención de estudiar cuan perceptibles son las tres herramientas numéricas a cambios en variables mediante el montaje numérico, analizar los resultados con los registros reales de la playa experimento y comparar los datos de salidas con miras al ejercicio de un desembarco anfibio, se determinó a ejecutar un análisis de sensibilidad modificando la fricción por fondo en el dominio de la playa estudio.

Referente a la representación numérica de altura de ola significativa (H_s), se obtiene altas correlaciones para las tres herramientas numéricas con coeficientes de determinación (R^2) robustos. El modelo XBeach representa con mayor precisión la altura de ola con un error RMSE menor a las otras herramientas. Se observa que tanto para SWAN+SHORECIRC como para OLUCA+COPLA, los resultados de altura de ola significativa no sufren apenas alteraciones al modificar la fricción por fondo. En cuanto a las corrientes “longshore”, XBeach sostiene un mayor coeficiente de determinación catalogándose como la herramienta con mayor bondad de ajuste seguido por SWAN+SHORECIRC con resultados moderadamente aceptables y dejando, por último, a la herramienta OLUCA+COPLA.

Índices MSI obtenidos por las predicciones de las tres herramientas numéricas se han comparado utilizando mapas del dominio y datos en tres puntos de control. Resultados de MSI obtenidos por las tres herramientas presentan valores máximos (zonas menos favorables) en las mismas zonas del dominio. Dicha observación permite estipular que hay una consistencia en la física de cada modelo.

Se ha encontrado que la magnitud de la altura de olaje significativa en rotura es el parámetro con mayor peso en el cálculo del criterio de desembarco MSI. Es por esto, por lo que la precisión en la obtención de las magnitudes de oleaje en la zona de rompientes es de gran importancia a la hora de definir la operatividad de un ejercicio anfibio.

Con base a las predicciones de altura de ola y corrientes litorales obtenidas por el modelo XBeach se dicta por efectiva la viabilidad del uso de la herramienta numérica para la evaluación temprana del desembarco anfibio en costa. Concerniente a las comparativas de las tres herramientas se ha concluido:

- A diferencia de XBeach, las herramientas SWAN+SHORECIRC y OLUCA+COPLA cuentan con una interfaz que le permite al usuario, de forma rápida y ordenada, establecer el montaje numérico y ejecutar la herramienta.
- Los patrones de corrientes simulados por SHORECIRC representan un comportamiento físico más real y detallado en comparación con las otras dos modelos de corrientes.
- La magnitud de las corrientes y sus patrones de flujo influyen en la zonificación de los valores de MSI a lo largo de la zona de estudio. De esta forma aportando peso en el valor final del MSI.

VIABILITY ASSESSMENT OF USE OF THE XBEACH MODEL

FOR EARLY EVALUATION OF AN AMPHIBIAN LANDING

MASTER'S DEGREE FINAL PROJECT

BY: DIEGO DELGADO TAMARIZ

DIRECTOR: GABRIEL DÍAZ HERNANDEZ

PROJECT SUMMARY

An amphibious landing, also known as amphibious warfare, can be defined as a maneuver launched from the sea by naval forces and landing forces against a coast. Understanding the physical processes present at the surf zone of the beach is indispensable in amphibious landing operations decisions. These physical processes are the breaking significant wave height (H_s), the time between successive breaking waves characterized through the mean period (T_m), the relative angle between breaking wave and the coast, breaking wave type, speed of currents "longshore" and the presence of wind. Over time, different numerical tools have been developed to describe the physical processes necessary in the breaking zone to establish the Modified Surf Index (MSI) operational index for landing exercises.

The objective of this Master's degree final project is to explore the possibility of using the XBeach model as a new numerical strategy for the calculation and quantification of hydrodynamics processes and littoral currents in the surf zone, with the idea of opening a new alternative for the final quantification of the MSI parameter.

Using instrumental data corresponding to Duck Beach in North Carolina, on the east coast of the United States, a general diagnosis of the use of XBeach has been made based on the calculation of the MSI parameter for an amphibious landing. The diagnosis consists of establishing comments, recommendations, and conclusions based on the quality of the predictions obtained, their efficiency, and overall reliability. All this compared to two other numerical tools, SWAN SHORECIRC and OLUCA COPLA, models commonly used in literature, which solve similar processes in the breaking zone in 2DH (2D horizontal, [x-y]).

Qualitative and quantitative fluctuations in the predictions of significant wave height and the speed of coastal currents present in the breaking zone are noticeable depending on the tool used. With the intention of studying how perceptible the three numerical tools are to changes in numerical scheme variables, analyzing the results with the actual records of Duck Beach, and comparing the output data with a view to amphibious landings, was determined to run a sensitivity analysis by modifying the bottom friction in the domain of the beach.

Regarding the numerical representation of significant wave height (H_s), high correlations are obtained for the three tools with robust determination coefficients (R^2). The XBeach model represents the wave height accurately with an RMSE error lower than the other two numeric tools. It is noted that for both, SWAN+SHORECIRC and OLUCA +COPLA, the results of significant wave height are hardly altered by modifying the bottom friction. As for the "longshore" currents, XBeach maintains a higher coefficient of determination by ranking itself as the tool with a better fit followed by SWAN+SHORECIRC with moderately acceptable results and by last, OLUCA+COPLA.

The MSI indices predictions of the three numerical tools are compared, establishing domain maps and data at three control points. MSI results maps illustrate maximum values (less favorable zones) in the same areas of the domain for the three numeric models. This observation makes it possible to stipulate that there is consistency in the physics of each model.

It has been found that the magnitude of the breaking significant wave height is the parameter with the highest weight in the calculation of the MSI landing criterion. Therefore, the accuracy in obtaining the H_s in the surf zone is of great importance at defining the operability of an amphibious exercise.

Based on the wave height and coastal currents predictions obtained, the XBeach model is categorized as a deliverable for early assessment of amphibious landing on the coast. Concerning the comparisons of the three tools has been concluded:

- Unlike XBeach, the SWAN SHORECIRC and OLUCA COPLA tools have an interface that allows the user, quickly and neatly, assemble and execute the numeric tool.
- The current patterns simulated by SHORECIRC represent a more real and detailed physical behavior compared to the other two current models.
- The magnitude of currents and their flow patterns influence the zoning of MSI values throughout the study area. In this way, contributing to the final MSI value.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ¿Qué es un desembarco anfibio?

El desembarco anfibio, también conocido como operación anfibia, se puede definir como maniobra lanzada desde el mar por fuerzas navales y fuerzas de desembarcos contra una costa. Las características de la costa en una operación anfibia se deben describir como potencialmente hostiles. Sin embargo, existen desembarcos anfibios con propósitos civiles o humanitarios que no tienen implicaciones de esta naturaleza (Ver Figura 1).

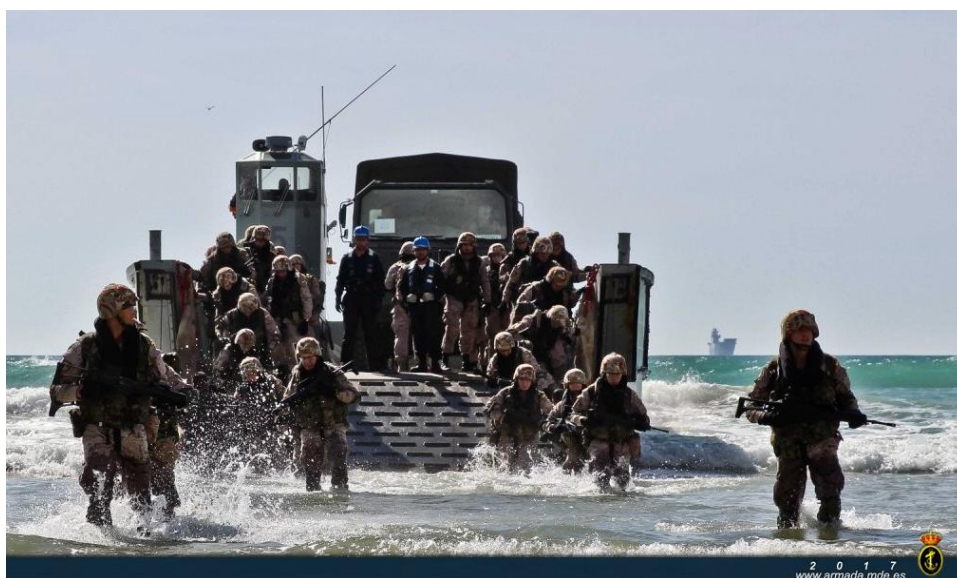


Figura 1. Ejecución de una operación anfibia. (Fuente: armada.mde.es)

Una operación anfibia requiere total control y mando con el propósito de conseguir esfuerzo unitario, rápida acción y coordinación sobre las capacidades del ejército ante el mar. En situaciones de combate, un desembarco anfibio emplea maniobras que le permiten, junto con fuerzas navales, la transición de mar a costa con el fin de conseguir una posición de ventaja ante el adversario. Por otra parte, en situaciones de no combate, las fuerzas de desembarco ajustan las fuerzas y recursos de forma a asegurar un apoyo oportuno y efectivo.

1.1.1. Tipos de Operaciones Anfibias

Incursión Anfibia

Una incursión anfibia es un tipo de operación anfibia que involucra la rápida incursión u ocupación temporal de una costa enemiga seguida por una retirada planificada. Sus objetivos podrían ser el apoderamiento temporal de un área con el fin de proteger, confundir a un adversario, destruir algún objetivo o capturar personal o equipo.

Asalto Anfibio

Comprende de un desembarco y firme establecimiento de fuerzas ante costa enemiga. Una operación de tipo asalto podría ser diseñada con la intención de cumplir como primera fase de una gran operación. De igual forma, podría ser con el fin de impedir el movimiento de operaciones enemigas.

Demostración Anfibia

Comprende en la demostración de fuerza anfibia donde las intenciones no son centradas ante un adversario. Este tipo de operaciones buscan engañar al adversario, haciendo que el adversario seleccione un curso de acción desfavorable. De igual forma, se puede usar para demostrar la capacidad y fuerzas militares.

Retirada Anfibia

Comprende en la extracción de fuerzas por barcos desde una costa potencialmente hostil. La retirada no tiene que estar familiarizada con operaciones anfibias o con la retirada planificada de una incursión anfibia.

Apoyo Anfibio

Comprende en contribuir a la prevención de conflictos y mitigación de crisis. Operaciones anfibias con miras a dar asistencia humanitaria, socorro ante casos de desastre, evacuación de civiles y operaciones de paz y recuperación.

1.1.2. Fases de una operación anfibia

Un ejercicio de desembarco anfibio se puede segregar en 5 fases fundamentales:

1. Planificación: se desarrolla a lo largo de toda la operación anfibia. Durante esta fase se tiene como objetivo estudiar detalladamente todos los aspectos involucrados para así establecer los pasos (fases) para llevar a cabo un ejercicio anfibio.
2. Embarque: fase en la cual las fuerzas, con su equipo y municiones, embarcan en los buques determinados.
3. Ensayo: fase durante la cual se analizan todos los detalles de la planificación, el horario detallado de las operaciones, comunicaciones, etc.
4. Movimiento hacia zona objetivo: comienza cuando la Fuerza Anfibia Operativa parten de los puertos de embarque hacia la zona objetivo-anfibia y termina cuando se llega a las posiciones establecidas en la planificación del desembarco.
5. Asalto: por último, el asalto anfibio comienza al llegar la zona objetivo y culmina con el cumplimiento de la misión asignada.

1.2. Actualidad de la oceanografía operacional al servicio del desembarco

Conocer los procesos físicos presentes en la zona de rompientes de una playa es indispensable a la hora de tomar decisiones adecuadas en operaciones de desembarco anfibio. Para describir la zona de rompientes, diferentes herramientas se han desarrollado a nivel internacional con el objetivo de asegurar un ejercicio desembarco exitoso. Cada una estas herramientas se basan en la obtención de

los procesos físicos necesarios en la zona de rompientes para establecer un índice operacional para el ejercicio. Estos son procesos físicos son: la altura de ola significativa (H_s) en rotura, el tiempo entre olas rompientes sucesivas caracterizado a través del periodo medio (T_m), ángulo relativo entre ola rompiente y la costa, tipo de rotura y velocidad de corrientes “longshore”.

Una vez que se definen y cuantifican las variables más relevantes en la zona de rompientes, estas se emplean para la obtención del Modified Surf Index (MSI), el cual establece una medida general de las condiciones presentes en la zona de rompientes de cara al desembarco anfibio.

Otros aspectos que influyen en el MSI son: el ancho de la zona de rompientes, longitud del oleaje en la zona de rompientes, profundidad promedio en el punto de rotura, dirección y velocidad del viento incidente, peralte del oleaje y velocidad de rompiente.

Hoy en día existen herramientas que permiten conocer los procesos físicos en la zona de rompientes antes, durante y después de un ejercicio de desembarco por medio de simulaciones numéricas. A continuación, se recoge una breve descripción de tres de las herramientas más relevantes que en la actualidad se han venido usando para poder evaluar las condiciones del oleaje en rompientes vinculado a la cuantificación del parámetro MSI.

SURF 3.2 (Navy Standard Surf Model)

SURF (Mettlach et al. 2002), es un modelo paramétrico de una dirección (1-D) el cual resuelve procesos de oleaje irregular tales como propagación – transformación de oleaje y corrientes “longshore”. Adicionalmente, el modelo se alimenta de la velocidad y dirección del viento. A ser un modelo 1-D, se consideran las siguientes hipótesis: batimetría recta y paralela (limitando las zonas de uso de la herramienta), oleaje descritas por distribución de Rayleigh (no considerando efectos no-lineales) y espectro direccional estrecho en frecuencia y dirección.

Algunos resultados de esta herramienta son: índices de MSI, perfiles transversales a costa de altura de oleaje significativa, longitud del oleaje, porcentaje de olas rompientes y corrientes “longshore” en la zona de rompientes, así como espectros direccionales del oleaje modificados por procesos de refacción y asomeramiento.

SWANSURF (Australia Department of Defence)

La herramienta numérica SWANSURF acopla dos modelos, Simulating WAVes Nearshore (SWAN) (Booij et al., 1999) y Navy Standard Surf Model (SURF), aprovechando la capacidad de propagación a costa del SWAN y el modelo de rotura de SURF 3.2. SWAN es un modelo (2-D) de propagación de oleaje espectral desde superficies oceánicas hasta zonas costeras reproduciendo adecuadamente los procesos de refracción y asomeramiento en un espacio geográfico y temporal.

El modelo SWANSURF acopla ambas herramientas numéricas anidando el modelo unidimensional de rotura SURF (anteriormente comentado) al modelo SWAN. De esta forma en la herramienta SWANSURF, SURF se alimenta de datos de salidas espectrales del SWAN. Así entonces permite combinar múltiples oleajes estableciendo condiciones de contorno más precisas de la zona bajo investigación (G. Christie, 2006).

Al acoplar el modelo SURF al SWAN, a diferencia del SURF 3.2 1-D, permite al usuario una visualización completa de la zona de desembarco. Al estar acoplado permite el modelo SWAN llamar el modelo SURF

automáticamente cada paso de tiempo aplicando los datos de entrada espectrales automáticamente al SURF. SWAN permite considerar dinámicas adicionales como el nivel del mar (marea).

SURF -DELFT 3D

Buscando alta precisión en la simulación de oleaje y corrientes litorales en zonas de batimetrías irregulares, se ha acoplado el sistema de modelaje Delft3D al SURF 3.2. Delft3D, desarrollado por *Delft Hydraulics*, es un sistema de modelado hidrodinámico costero capaz de simular procesos físicos debidos a oleajes, mareas, ríos y puede ser ejecutado en coordenadas esféricas o cartesianas para mallas numéricas regulares y curvilíneas (Dykes, J.D. et al. 2005).

Se ha establecido una herramienta a partir de las subrutinas numéricas del modelo SURF 3.2, cálculos de los parámetros necesarios para obtener el MSI, y los resultados de salida de oleaje y flujo del Delft3D con el propósito de optimizar los resultados en la zona de. Las tablas de resumen sobre datos de salidas e informes de resultados se mantienen idénticos a los emitidos por SURF 3.2.

1.3. Adaptación de nuevas herramientas

Al igual que los responsables por las herramientas anteriormente descritas, el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHCantabria) se ha involucrado en la oceanografía operacional al servicio del desembarco. El instituto ha utilizado diferentes modelos numéricos con el propósito de estudiar el cálculo del criterio de desembarco MSI.

Mediante El Trabajo de Fin de Máster (TFM del Máster de Ingeniería Costera y Portuaria, Universidad de Cantabria): “Sistema Predicción Operacional para movimiento buque-costa” por el T.N. Alejandro Ortega Felipe se estudiaron las afecciones de las dinámicas litorales para las operaciones anfibias en la Playa del Retín, España. Buscando proporcionar una metodología que permita el desarrollo de un sistema operacional orientado al apoyo REA (*Rapid Environmental Assessment*) de una Fuerza Naval se utilizaron las herramientas numéricas de propagación espectrales SWAN y OLUCA (SMC-MOPLA) al igual que la herramienta COPLA (perteneciente al Sistema de Modelado Costero, SMC) para la obtención de los flujos de corrientes.

Continuando con los estudios y los esfuerzos el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y el IHCantabria han desarrollado un Sistema Operacional específico para operaciones anfibias. El Sistema Operacional para Operaciones Anfibias (SOPROA) abarca información climática *HINDCAST* e información de predicción *FORECAST*. El sistema operacional permite gestionar operaciones anfibias mediante herramientas de apoyo fiables, precisas, operativas y automatizadas.

La GUI (*Graphical User Interface*) SOPROA utiliza el modelo espectral de propagación de oleaje SWAN acoplado al modelo quasi 3D de circulación costera SHORECIRC con la finalidad de generar productos finales de navegabilidad, MSI y varada estadísticos en zonas de interés (Ortega, A.F. et al. 2018). SOPROA ha sido probado en tres maniobras específicas para operaciones anfibias, dos en territorio nacional en la playa del Retín y una en Portugal, playa A Raposa obteniendo resultados de MSI aceptables.

2. OBJETIVOS Y TAREAS

Tras haber introducido la importancia de las operaciones de desembarco anfibio, y haber explicado las estrategias numéricas que actualmente se emplean, a continuación, se presenta el objetivo general del presente TFM, así como los objetivos secundarios y tareas generales.

El objetivo del presente trabajo es explorar la posibilidad de emplear una nueva estrategia numérica para el cálculo y cuantificación de los procesos de oleaje y corrientes de rotura en la zona de rompientes, con la idea de abrir una nueva alternativa para la cuantificación final del parámetro MSI en costa y, por tanto, establecer una posible mejora sustancial en la predicción futura del desembarco anfibio militar.

Objetivos secundarios:

1. Emplear el modelo XBeach para la cuantificación del oleaje y corrientes en zona de rompientes, aprender a usar la herramienta y establecer el método para su uso adecuado.
2. Comparar el modelo XBeach con dos modelos de uso habitual en la literatura, que resuelven procesos análogos en la zona de rompientes en el ámbito 2DH (2D en horizontal, [x-y]), con base en datos instrumentales provenientes de una campaña de campo.
3. Realizar un diagnóstico general del uso futuro de la herramienta XBeach en el cálculo del parámetro MSI para el desembarco anfibio, estableciendo comentarios, recomendaciones y conclusiones con base en la calidad de las predicciones obtenidas, su eficiencia, fiabilidad general. Todo ello en comparación con los otros dos modelos usados.

3. HERRAMIENTAS NUMÉRICAS

El primer análisis técnico del presente TFM, consiste en la descripción general y uso de las herramientas seleccionadas: el modelo XBeach, los modelos OLUCA+COPLA y los modelos SWAN-SHORECIRC. Todos ellos empleados tradicionalmente para cuantificar el oleaje y corrientes en la zona de rompientes.

3.1. Modelo XBeach

Desarrollado por *Deltares*, es un modelo de 2DH (procesos promediados en vertical) que fue desarrollado originalmente para simular procesos hidrodinámicos y morfodinámicos en costas arenosas en un dominio de kilómetros, a una escala temporal de corto plazo, como tormentas y condiciones de huracanes. Hoy en día, debido a sus múltiples validaciones y aplicaciones, la herramienta numérica se ha utilizado en otros tipos de costas y propósitos. El modelo ha sido de interés para el estudio de costas compuestas de gravas, así como el estudio de cambios morfológicos a escalas temporales de meses o incluso años.

XBeach resuelve las ecuaciones de balance de acción de la ola, de masa y de momentum en aguas poco profundas, fórmulas de transporte de sedimentos, así como las de actualización del fondo (Roelvink et al.,2010). Emplea el modelo de energía de roller para la cuantificación de la rotura. La herramienta XBeach cuenta con tres opciones hidrodinámicas permitiendo al usuario establecer la que mejor le corresponda dependiendo de los procesos hidrodinámicos a simular:

1. Modelo estacionario: resuelve las ecuaciones de oleaje promediado desatendiendo las ondas largas (infragravitatorias).
2. Modelo “Surfbeat” (no estacionario): se resuelven las ondas cortas a una escala de oleaje en grupos y las ondas largas asociadas a grupos. Modelo hidrodinámico empleado en el presente trabajo.
3. Modelo No-hidrostático (“wave resolving”): resuelve la propagación y la transformación de ondas individuales.

La Figura 2 ilustra los procesos hidrodinámicos relevantes para los modelos No-hidrostático y “Surfbeat”. La línea azul representa las olas cortas (No-hidrostático), la línea negra la envolvente de las olas cortas (“Surfbeat”) y la línea roja establece la onda larga relacionada al oleaje.

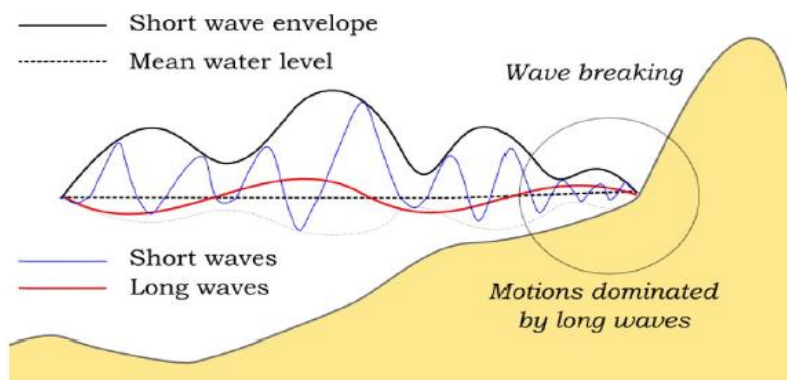


Figura 2. Diagrama de procesos hidrodinámicos relevantes. (Fuente: xbeach_manual. html)

3.1.1. Ecuaciones generales

Las ecuaciones que resuelve el modelo XBeach son:

Balance de acción de la ola

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial C_x A}{\partial x} + \frac{\partial C_y A}{\partial y} + \frac{\partial C_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_{waves}}{\sigma}$$

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)}$$

Donde:

A , densidad de acción del oleaje.

θ , ángulo de incidencia con respecto al eje x .

σ , frecuencia intrínseca de la ola obtenida de la relación lineal de dispersión.

S_w , densidad de energía del oleaje en cada sector direccional.

D_{waves} , disipación de energía debido a la rotura de la ola.

(C_x, C_y) , celeridad de propagación de la acción del oleaje en los componentes x e y .

C_θ , celeridad de propagación de la energía de la ola, teniendo en cuenta la refracción por fondo/corrientes.

El esquema numérico del modelo cuenta con diferentes formulaciones para tomar en cuenta la disipación del oleaje debido a la rotura del oleaje (e.g., Roelvink (1993)). Por otra parte, el modelo cuenta con un balance de energía del oleaje en rompientes el cual busca redistribuir la energía de las olas rompiendo.

Balance de energía en la zona de rompientes

$$\frac{\partial S_{roller}}{\partial t} + \frac{\partial C_x S_{roller}}{\partial x} + \frac{\partial C_y S_{roller}}{\partial y} + \frac{\partial C_\theta S_{roller}}{\partial \theta} = -D_{roller} + D_{waves}$$

Donde:

$S_{roller}(x, y, t, \theta)$, energía del oleaje en rompientes en cada sector direccional.

D_{waves} , disipación de energía debido a la rotura de la ola.

D_{roller} , disipación de energía roller debido a la rotura de la ola.

Ecuaciones de flujo en agua someras (NLSWE)

El modelo XBeach utiliza las siguientes ecuaciones para simular las variaciones de la superficie del agua y el flujo, incluyendo oleaje infragravitatorio y corrientes inducidas por oleaje propagado.

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h}$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0$$

Donde:

(u^L, v^L) , componentes de las velocidades de la profundidad promedio de flujo (langragianas).

$(\tau_{bx}^E, \tau_{by}^E)$, esfuerzos cortantes de fondo (*bed shear stresses*).

(τ_{sx}, τ_{sy}) , componentes del esfuerzo del viento en la superficie del agua.

(F_x, F_y) , componentes de los esfuerzos de radiación inducidos por el oleaje.

v_h , viscosidad horizontal

f , parámetro de Coriolis

3.1.2. Procesos físicos

El modelo XBeach simula procesos de propagación de oleaje, ondas largas y flujo medio, transporte de sedimentos y cambios morfológicos en playas y dunas durante tormentas. En la propagación del oleaje los procesos de refracción, asomeramiento y rotura son resueltos. Así también, los procesos relacionados a transformación de ondas largas (generación, propagación y disipación) al igual que *set-up* inducido por oleaje son representados por el modelo. Por otra parte, el modelo no simula, de forma adecuada, los fenómenos de difracción y reflexión.

3.2. SWAN+SHORECIRC

El modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) desarrollado por Delft University of Technology es un modelo de propagación de oleaje espectral que resuelve la ecuación de acción del espectro de la onda. Este modelo simula la energía contenida en las ondas durante su propagación desde superficies oceánicas hasta zonas costeras reproduciendo adecuadamente los procesos de refracción y asomeramiento en un espacio geográfico y temporal (The SWAN Team, 2014).

SHORECIRC desarrollado por C.A.C.R., *University of Delaware*, es un modelo numérico cuasi-3D capaz de reproducir corrientes y ondas largas inducidas por viento y oleaje. El modelo combina las soluciones analíticas de perfiles 3D de corrientes con los resultados numéricos de las ecuaciones 2D promediadas en vertical (Haas, K. A., & Warner, J. C., 2009).

3.2.1. Ecuaciones generales

El modelo **SWAN** se basa en la ecuación de conservación de la acción de la ola, expresada por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_{gx}N}{\partial x} + \frac{\partial C_{gy}N}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta}N}{\partial \theta} + \frac{\partial C_{\sigma}N}{\partial \sigma} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Donde:

$$N = \frac{E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma}$$

C_{gx} , celeridad de grupo en la dirección x

C_{gy} , celeridad de grupo en la dirección y

C_{σ} , cambio de las frecuencias relativas de energía espectral debido al fondo/corrientes

C_{θ} , cambio de la dirección de energía espectral debido al fondo/corrientes

$S_{tot} = S(\sigma, \theta; x, y, t)$, forzamiento espectral direccional

La energía de la ola no se conserva debido al intercambio de energía entre olas y corrientes. Por lo tanto, el modelo numérico utiliza el espectro de densidad de acción de ola $N(\sigma, \theta)$ en vez del espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$.

El modelo **SHORECIRC** incorpora los efectos en la columna de agua (verticales) en el flujo horizontal.

$$u_{\alpha} = u'_{\alpha} + u_{w\alpha} + V_{m\alpha} + V_{d\alpha}$$

$$\overline{Q}_{\alpha} \equiv \overline{\int_{-h_0}^{\zeta} u_{\alpha} dz}$$

$$Q_{w\alpha} \equiv \overline{\int_{\zeta_0}^{\zeta} u_{w\alpha} dz}$$

$$V_{m\alpha} \equiv \frac{\overline{Q}_{\alpha} - Q_{w\alpha}}{h}$$

Donde

u'_{α} , fluctuaciones debido a estado turbulento

$u_{w\alpha}$, velocidad orbital

$V_{m\alpha}$, velocidad promediada en vertical

$V_{d\alpha}$, velocidad variante en vertical

ζ , nivel medio del agua (MWL)

ζ_t , oleaje por el nivel

h_o , still wáter depth

$h = h_o + \zeta$

Utilizando las anteriores expresiones, la masa oleaje promedio y las ecuaciones de momentum se expresan por:

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{Q}_a}{\partial x_\alpha} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{Q}_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(\frac{\bar{Q}_a \bar{Q}_\beta}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_\beta} \overline{\int_{-h_o}^{\zeta} V_{d\alpha} V_{d\beta} dz} + \frac{\partial}{\partial x_\beta} \overline{\int_{\zeta_t}^{\zeta} u_{w\alpha} V_{d\beta} + u_{w\beta} V_{d\alpha} dz} \\ = -gh \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x_\alpha} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left[S_{\alpha\beta} - \overline{\int_{-h_o}^{\zeta} T_{\alpha\beta} dz} \right] - \frac{\tau_\alpha^B}{\rho} \end{aligned}$$

Donde:

g , gravedad

ρ , densidad del agua

$S_{\alpha\beta}$, tensor de radiación

$T_{\alpha\beta}$, esfuerzos por turbulencia

τ_α^B , esfuerzos cortantes en el fondo

β , índice de repetición para las coordenadas horizontales

La solución para la velocidad variante en vertical de las corrientes ($V_{d\alpha}$) están dadas por el método de Putrvu and Svendsen (1999). Aplicando las ecuaciones de momentum horizontales para oleaje promediado no integrado en vertical y asumiendo un flujo cuasi-constante y utilizando formulación de viscosidad de eddy para el esfuerzo cortante se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial V_{d\alpha}}{\partial z} \right) = g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x_\alpha} + f_\alpha + V_\beta \frac{\partial V_\alpha}{\partial x_\beta} + W \frac{\partial V_\alpha}{\partial z}$$

$$f_{\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_{\beta}} (u_{w\alpha} u_{w\beta}) + \frac{\partial}{\partial x_z} (u_{w\alpha} u_w)$$

3.2.2. Procesos físicos

El modelo SWAN, modelo de propagación de oleaje definido numéricamente por una ecuación de transporte de energía, resuelve los procesos físicos de refracción, reflexión, asomeramiento y rotura. De igual manera comprende la generación local de oleaje por viento, disipación por fondo, disipación por *white-capping* e interacciones no-lineales entre componentes. El modelo de propagación presenta limitaciones en reproducir procesos de difracción.

3.3. OLUCA+COPLA

Las herramientas numéricas OLUCA y COPLA forman parte de la *suite* SMC-MOPLA, herramienta desarrollada originalmente por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria (GIOC) y actualmente por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH Cantabria) dirigida al estudio del funcionamiento costero en general. OLUCA es un modelo espectral no dispersivo de propagación de oleaje que se encarga de resolver la fase de la onda a partir de la ecuación de la pendiente suave (MSF). El modelo utiliza la aproximación parabólica mediante diferencias finitas. La herramienta numérica COPLA resuelve las corrientes de rotura promediadas en vertical tomando como dato de entrada los datos de salida del modelo de propagación OLUCA. COPLA utiliza las ecuaciones de flujo dentro de la zona de rompientes basándose en las ecuaciones promediadas del movimiento y la ecuación de la continuidad.

3.3.1. Ecuaciones generales

El modelo espectral de propagación, OLUCA-SP, se basa en el modelo numérico parabólico expresado a continuación (GIOC, 2001) :

$$\begin{aligned} & (C_{gj} + U)(A_{jl})_x - 2\Delta_l V(A_{jl})_y + i(k_j - a_0 k_j)(C_{gj} + U)A_{jl} \\ & + \left\{ \frac{\sigma_j}{2} \left(\frac{C_{gj} + U}{\sigma_j} \right)_x - \Delta_l \sigma_j \left(\frac{V}{\sigma_j} \right)_y \right\} A_{jl} \\ & + i\Delta_j' \left[\left((CC_g)_j - V^2 \right) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_y \\ & - i\Delta_l \left\{ \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_x + \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x \right]_y \right\} \\ & - \frac{b_l}{k_j} \left\{ \left[\left((CC_g)_j - V^2 \right) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_{yx} + 2i \left(\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +b_l\beta_j \left\{ 2i\omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + 2i\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y - 2UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{xy} + \left[\left((C C_g)_j - V^2 \right) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right] \right\} \\
 & - \frac{i}{k_j} b_l \left\{ (\omega_j V)_y + 3(\omega_j U)_x \right\} \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x \\
 & - \Delta_2 \left\{ \omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + \frac{1}{2} \omega_j U_x \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right\} + ik_j \omega_j U (a_0 - 1) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \\
 & + \alpha A_{jl} + \frac{\gamma_j}{2} A_{jl} + \frac{i\sigma_j}{2} G_{jl} (|A|_{jl}, k_j h) A_{jl} = 0
 \end{aligned}$$

Donde las variables se definen como:

$A_{jl} = A(x, y)$, función compleja de la amplitud, para una componente frecuencial j y direccional l

$h = h(x, y)$, profundidad

$\vec{U} = (U, V)$, vector velocidad de la corriente en el eje x e y respectivamente

ω_j , frecuencia angular absoluta de la componente j

σ_j , frecuencia angular intrínseca de la componente j

C_j , celeridad de fase o de la ola de la componente j

C_{gj} , celeridad de grupo de la componente j

k_j , numero de onda local de la componente j

\vec{k}_j , numero de onda medio en y de la componente j

$$\begin{aligned}
 \sigma_j &= \omega_j - k_j \\
 \beta_j &= \frac{1}{k_j^2} \frac{\partial k_j}{\partial x} + \frac{1}{2k_j^2 (C_j C_{gj} - U^2)} \frac{\partial}{\partial x} [k_j (C_j C_{gj} - U^2)] \\
 \Delta_1 &= a_1 - b_1; \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1; \Delta_j = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}_j}{k_j} \\
 D_j &= \frac{\cosh(4k_j h) + 8 - 2\tanh^2(k_j h)}{8\sinh^4(k_j h)}
 \end{aligned}$$

OLUCA-SP implementa el Padde (1,1), recomendado por Kirby (1994), obteniéndose resultados razonables dentro de los $\pm 55^\circ$ respecto al eje x .

COPLA

El modelo bidimensional de corrientes en playa se deriva de las ecuaciones de movimiento de fluido, Navier-Stokes. Al integrar estas ecuaciones respecto la profundidad y promediar un periodo de tiempo bajo un sistema de coordenadas localizado en el nivel medio del mar (x = dirección transversal a costa; y = dirección longitudinal a costa) se obtiene las siguientes expresiones de continuidad y cantidad de movimiento (GIOC, 2001):

Continuidad:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0$$

Momentum:

Dirección x (transversal a la playa)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{I}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xx}) + \\ & \frac{I}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xy}) + \frac{gU}{C^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} - \varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned}$$

Dirección y (longitudinal a la playa)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{I}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{xy}) + \\ & \frac{I}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{yy}) + \frac{gV}{C^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} - \varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned}$$

Donde:

$$H = \eta + h$$

$$(S_{xx}) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho u^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 \rho_0 dz dt$$

$$(S_{yy}) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho v^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 \rho_0 dz dt$$

$$(S_{xy}) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} \rho uv dz dt$$

$$V = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} v(x, y, z, t) dz dt$$

$$\eta = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \eta(x, y, t) dt$$

$$U = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} u(x, y, y, t) dz dt$$

Teoría lineal - tensores de radiación al 2 orden:

$$S_{xx}(x, y) = E \left(n \cos^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right)$$

$$S_{yy}(x, y) = E \left(n \sin^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right)$$

$$S_{xy}(x, y) = E \sin \theta \cos \theta$$

Donde:

$$E = \frac{\rho g H_1^2}{8}$$

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right]$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

Parámetros (H_1, T, θ, h) se obtienen a partir del “Modelo de Propagación de Oleaje” (OLUCA-SP).

3.3.2. Procesos físicos

El modelo OLUCA, modelo espectral no dispersivo de propagación del oleaje, resuelve los procesos físicos principales de refracción, difracción, asomeramiento y rotura. Al igual que términos no lineales, simulación de la capa límite turbulenta o laminar y rugosidad por fondo. La ecuación de la pendiente suave en su forma parabólica es altamente utilizada y aceptada a la hora de simular procesos como la refracción y difracción en grandes dominios. El modelo de propagación sostiene condiciones de presión constante en la superficie libre del dominio. Por otra parte, no considera la acción del viento ni la aceleración de Coriolis. Debido al esquema numérico, los procesos de reflexión en dirección contraria no son tomados en cuenta. Por último, el modelo COPLA sustentado por los tensores de radiación permite la presencia de corrientes.

3.4. Montaje y uso de los modelos

Esta sub-sección presenta una descripción del montaje numérico para cada una de las herramientas numéricas descritas anteriormente. El montaje numérico se puede definir como la etapa en cual se establece una discretización del dominio de interés (dominio/mallado numérico) y la estructura de datos de entrada y salida que se requieren para el análisis del comportamiento aproximado de la física a modelar, así como las consideraciones generales de cara a su adecuado uso.

Las tres herramientas que se emplean en el presente trabajo tienen su propia forma de montaje en este caso llamada hipótesis de montaje, la cual depende de ciertas recomendaciones o restricciones brindadas al usuario mediante manuales o reportes.

3.4.1. Modelo XBeach

La herramienta XBeach, no cuenta con una interfaz para el usuario, utiliza un sistema local de coordenadas en metros para el montaje de mallas numéricas rectangulares.

El diseño del dominio numérico requiere seguir estas recomendaciones: el eje X, siempre se debe orientar perpendicular a la línea de costa (*Cross-shore*) y el eje perpendicular a este (*long-shore*). Por ello, el montaje debe satisfacer un sistema local de coordenadas, por lo que el usuario debe orientar el dominio respecto a las coordenadas globales con origen (X_{ori} (0), Y_{ori} (0)), una orientación ($\alpha = 0$) y una rotación donde la costa quede al lado derecho del montaje numérico (Ver Figura 3).

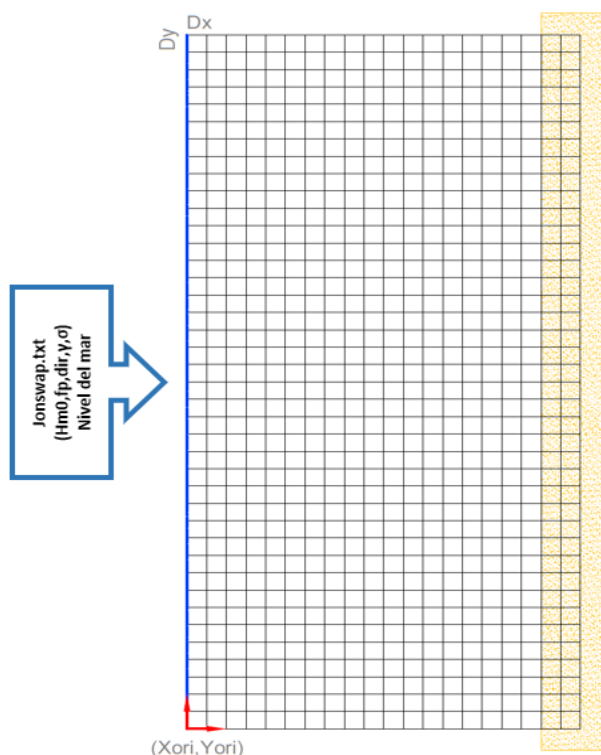


Figura 3. Esquema de montaje general del modelo XBeach.

El modelo XBeach establece todos los parámetros en un fichero llamado **paramas.txt** cual es leído por el ejecutable **xbeach.exe**. Este fichero de parámetros contiene la información de la malla numérica y batimetría y los parámetros de partida de oleaje, corrientes y morfológicos.

Las condiciones de contorno de oleaje y nivel del mar son aplicadas en el contorno exterior del dominio ($X_{ori}=0$). El modelo permite establecer condiciones de contorno espectrales y no-espectrales. Por otra

parte, en las condiciones laterales no se puede aplicar oleaje manteniendo constante las elevaciones de la superficie y velocidad por defecto.

Los datos de salida: nivel del mar, elevaciones del fondo, elevación de la superficie (altura de ola significativa), velocidades de flujo son reflejadas en los centros de las celdas de la malla, con una resolución media de (5m-20m).

3.4.2. SWAN + SHORECIRC

La herramienta SWAN + SHORECIRC resuelve su sistema de ecuaciones bajo un esquema de diferencias finitas sobre dos mallas rectangulares. La interfaz permite dominios batimétricos con sistema de coordenadas geográficas o en UTM.

El modelo SWAN calcula la propagación de oleaje en una malla de estructura general y con una resolución entre 100 y 25 m (típica de este tipo de solución numérica para propagación desde aguas intermedias/profundas hasta la costa). Embebida en esta primera malla, se establece la malla de detalle, también rectangular, pero con la capacidad de reducir su resolución conforme se aproxima a la costa (con resoluciones entre 25 a 5 m en general), en la cual se obtendrán las corrientes mediante SHORECIRC. (Ver Figura 4).

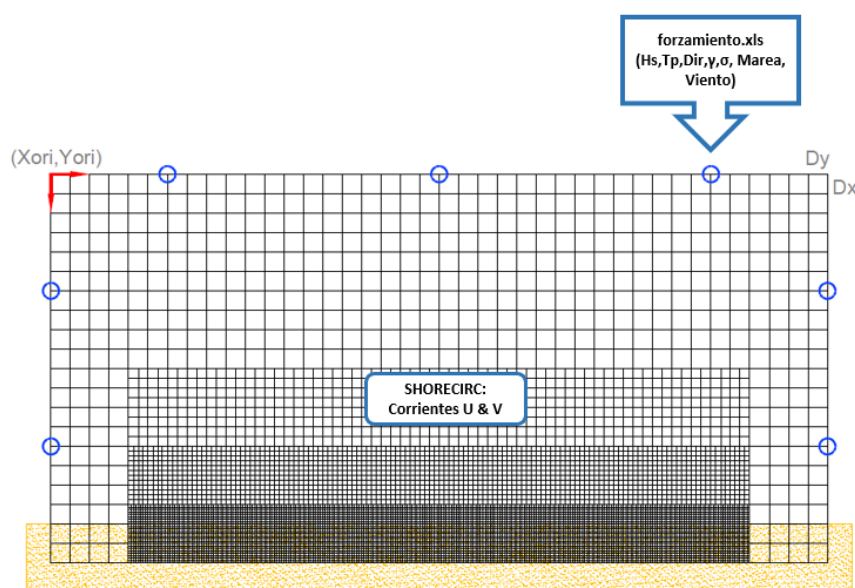


Figura 4. Esquema de montaje general de la herramienta SWAN+SHORECIRC.

En la malla general, el eje X es orientado arbitrariamente por el usuario, desde mar adentro hacia la línea de costa, siendo el eje Y perpendicular a él, considerando sus características geográficas reales (origen, orientación, tamaño, etc.). Los datos de entrada, en este caso espectrales, se establecen en puntos a lo largo del contorno exterior de la malla. La interfaz se alimenta de los datos de entrada: oleaje, viento y nivel mar estructurados en tablas para cada estado de mar.

En cada nodo de la malla numérica se obtienen los datos de altura de ola significativa, así como los componentes U y V de la velocidad de la corriente. La interfaz le provee al usuario mapas de oleaje y corrientes automáticamente.

3.4.3. OLUCA + COPLA

La herramienta OLUCA+COPLA resuelve las ecuaciones presentadas anteriormente por un método de diferencias finitas sobre dos mallas rectangulares. La interfaz MOPLA-SMC permite al usuario utilizar una malla general, abarcando el dominio con resolución moderada (entre 100-35 m), anidada a una malla de detalle (entre 35m -5m), permitiendo una mayor resolución en la zona de interés (Ver Figura 5

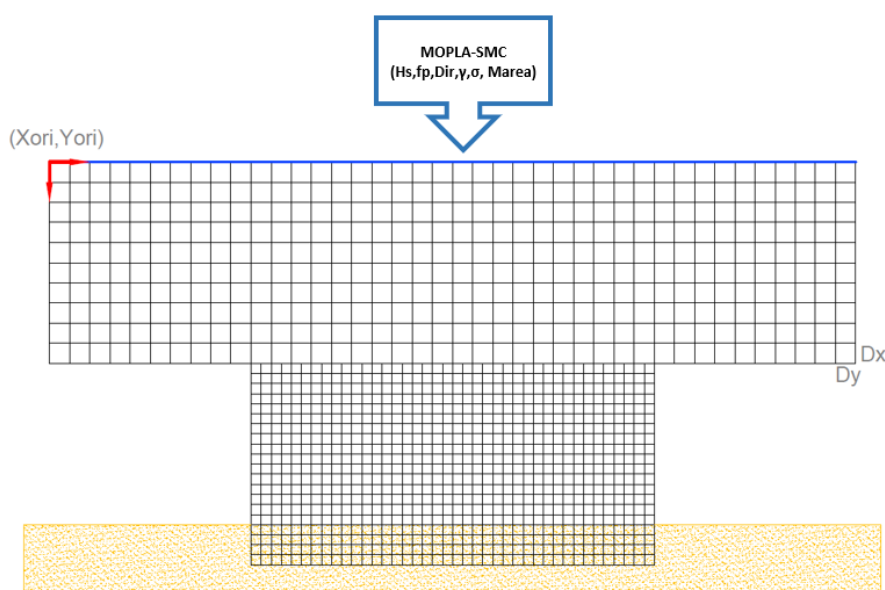


Figura 5. Esquema de montaje general de la herramienta OLUCA+COPLA.

Dicha malla está formada por una red rectangular de puntos estableciendo un espacio: Dx y Dy. El eje X, limitado por las restricciones numéricas de $\pm 55^\circ$, orientado a la dirección de la propagación del oleaje, (debido a la naturaleza parabólica de las ecuaciones), desde mar adentro hacia la línea de costa, siendo el eje Y perpendicular a él.

El modelo de propagación es alimentado por un espectro bidimensional se establecen en el contorno exterior de la malla (línea azul de Figura 5). Las condiciones de contorno laterales son descritas por contornos abiertos permitiendo transmisión del oleaje.

En cada nodo de la malla numérica se obtienen los parámetros relacionados a la propagación del oleaje: altura de ola, periodo, dirección y profundidad. Estos mismos son utilizados por el modelo COPLA para calcular las corrientes componentes U y V en el dominio numérico.

4. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA XBEACH

En este capítulo se emplea la validación del modelo XBeach y la comparación del modelo con las herramientas OLUCA+COPLA y SWAN+SHORECIRC. Una validación de datos consiste en comprobar que tanto la herramienta numérica se aproxima los procesos físicos reales que intentan simular. Para esto, se establece una base en datos instrumentales provenientes de una campaña de campo (playa experimento).

4.1. Playa Duck, Carolina del Norte

En el presente TFM se ha identificado un conjunto de datos instrumentales de gran relevancia, y que se corresponden a la playa-experimento Duck en Carolina del Norte, costa este de los Estados Unidos. La Playa Duck se localiza en una barra arenosa estrecha siendo una playa abierta, generalmente uniforme y en ella se encuentra un muelle sobre pilares, véase Figura 6. Es una playa de estado morfodinámico reflejante intermedia con una pendiente de playa β_f de 0.10 (Stockdon et al.,2005).

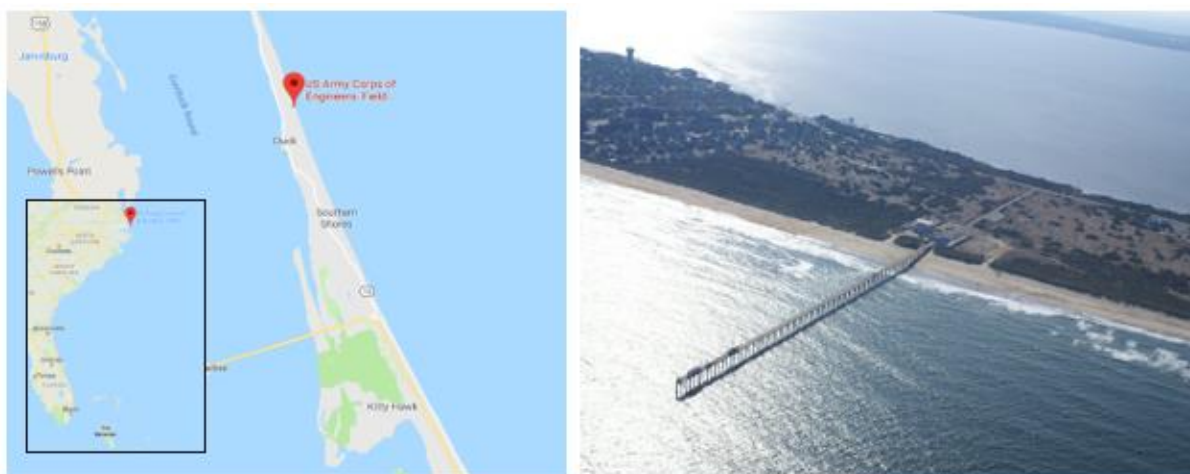


Figura 6. Localización de la Playa Duck en el estado de Carolina del Norte a la costa este de los Estados Unidos.

En la playa de Duck se encuentran las instalaciones de investigación del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, Field Research Facility (FRF). Las facilidades sirven de centro de observación costera y se han llevado experimentos de gran envergadura como: SandyDuck'97, DELILAH y Duck94. Las facilidades cuentan con sensores que mantienen registros de oleajes, nivel del mar, corrientes, vientos y otras dinámicas durante los últimos 30 años.

Para la validación propuesta en este TFM, se ha seleccionado un mes de mediciones correspondientes al mes de diciembre del 2016. Los datos necesarios, registros de oleaje, corrientes, nivel del mar y batimetría, se obtuvieron de bases de datos "thredds" y de la herramienta *Data Portal* encontradas en la página web del FRF (<https://frfdataportal.erdc.dren.mil/#>).

4.1.1. Batimetría

La batimetría empleada corresponde al mes de noviembre del 2016. El dominio, en Lon-Lat y referenciado al datum NAV88, recorre la zona experimental establecida por el Field Research Facility (FRF). El dominio batimétrico se describe como cuasi recto y paralelo con una elevación topográfica de

alrededor de 2 metros hasta una elevación batimétrica de alrededor de 9 metros, obteniendo una pendiente batimétrica de 1.1 % (ver Figura 7)

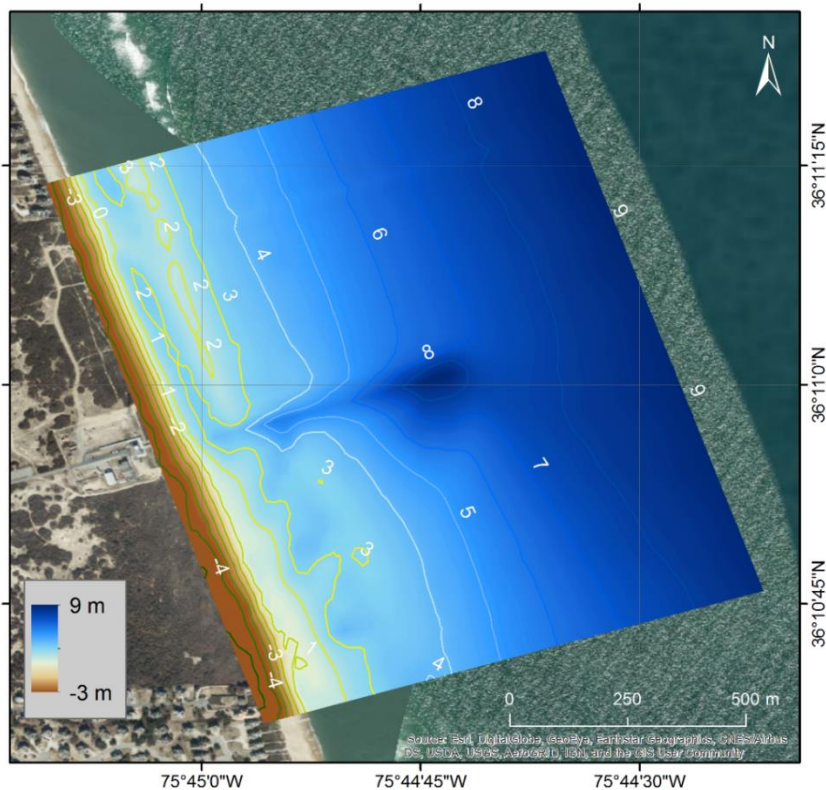


Figura 7. Mapa del dominio batimétrico de la playa experimento.

A lo largo de la playa se observa la presencia de una barra morfológica la cual aumenta hacia el norte de la costa. Esta barra, resultado de las dinámicas marinas de la zona, presenta un canal a lo largo a la playa. Por otra parte, se observa como en la ubicación del muelle, mostrado en la Figura 6, se presenta una mayor profundidad creando un canal o depresión, en este caso transversal a la línea de costa. La playa experimento se encuentra a 162° respecto al Norte con un tamaño de grano generalmente mediano. Estas observaciones serán de gran importancia a la hora de analizar el comportamiento de las hidrodinámicas en la zona.

Sensores FRF Portal

El portal FRF permite obtener las series temporales (registros) para cada uno de los sensores activos para la fecha que el usuario establezca. Para el mes de diciembre del 2016 se localizaron tres sensores de oleaje, dos de corrientes y uno de nivel del mar (ver Tabla 1). En la Figura 8 se vuelve a representar el dominio batimétrico de la playa experimento, esta vez con las ubicaciones de los sensores de medición.

Tabla 1. Sensores activos utilizados con coordenadas e información descriptiva.

Sensor	Coordenadas	Información
#1 (Oleaje)	Lon=-75.7429 Lat=36.1872	<p>“Array” con sensores de presión ubicado en una profundidad aproximada de 8 metros (NAVD88). Localización satisface tres restricciones:</p> <p>Afuera de la zona de rompientes → Teoría linear aplicable en el proceso de los datos.</p> <p>Profundidad suficiente para detectar periodos hasta de 3 segundos.</p> <p>Ubicado distante de las isóbatas irregulares alrededor del muelle de observación.</p>
#2 (Oleaje / Corrientes)	Lon=-75.7465 Lat=36.1873	Instrumento <i>Nortek AWAK</i> en una profundidad aproximada de 6 metros (NAVD88). [aveU aveV]
#3 (Corrientes)	Lon=-75.7489 Lat=36.1867	Intrumento <i>Nortek Aquadopp profiler</i> en una profundidad aproximada de 3.5 metros (NAVD88). [aveU aveV]
#4 (Oleaje)	Lon=-75.7498 Lat=36.1865	Intrumento <i>Nortek Aquadopp profiler</i> en una profundidad aproximada de 3 metros (NAVD88).

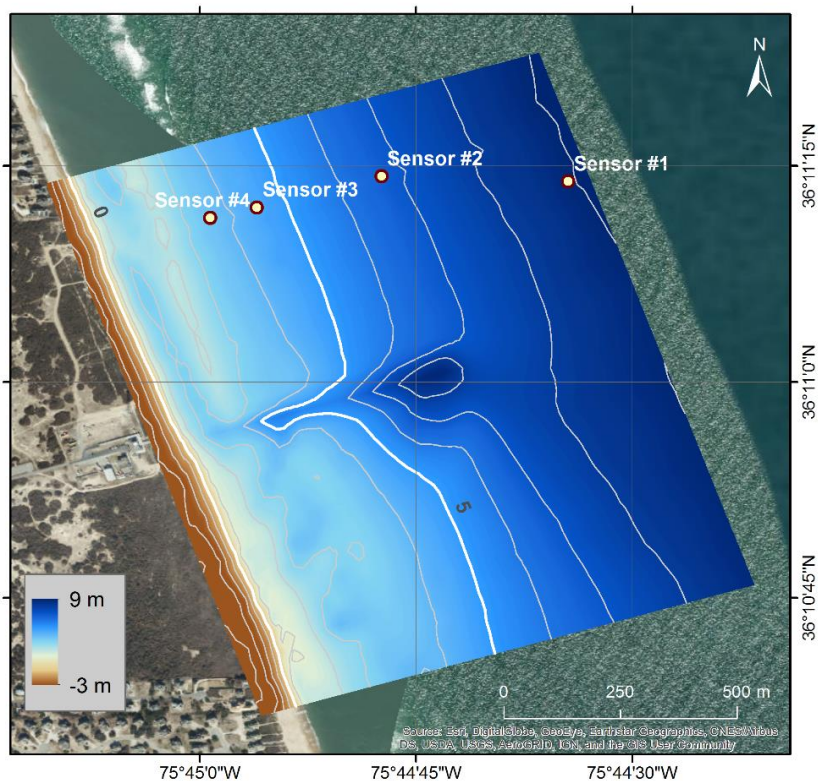


Figura 8. Ubicación de los sensores en el dominio de estudio.

Es importante destacar que el sensor #1 nos aporta los datos de oleaje (Hs, Tp, Dir) y nivel del mar empleados como forzamiento general de los modelos. Estos datos se han establecido en los contornos exteriores del dominio seleccionado.

En la Figura 9 se ilustran las series de tiempo en bruto que el USACE brinda al usuario en el portal del FRF para el sensor #1. Para el valor de Hs se pueden observar dos estados de mar en los cuales el oleaje supera los 2 m de altura; uno el 6 de diciembre a las 20:00 con una altura de 2.14 m, periodo pico de 7.75 s y dirección de respecto al norte de 105°; y el más energético el 19 de diciembre a las 13:00 con una altura de 2.42 m, periodo pico de 7.07 s y una dirección respecto al norte de 80°. El periodo presenta una fluctuación entre los 3.4 s y los 11.3 s, mientras que la dirección del oleaje se concentra mayormente en el abanico direccional del Norte hasta Sureste de la playa.

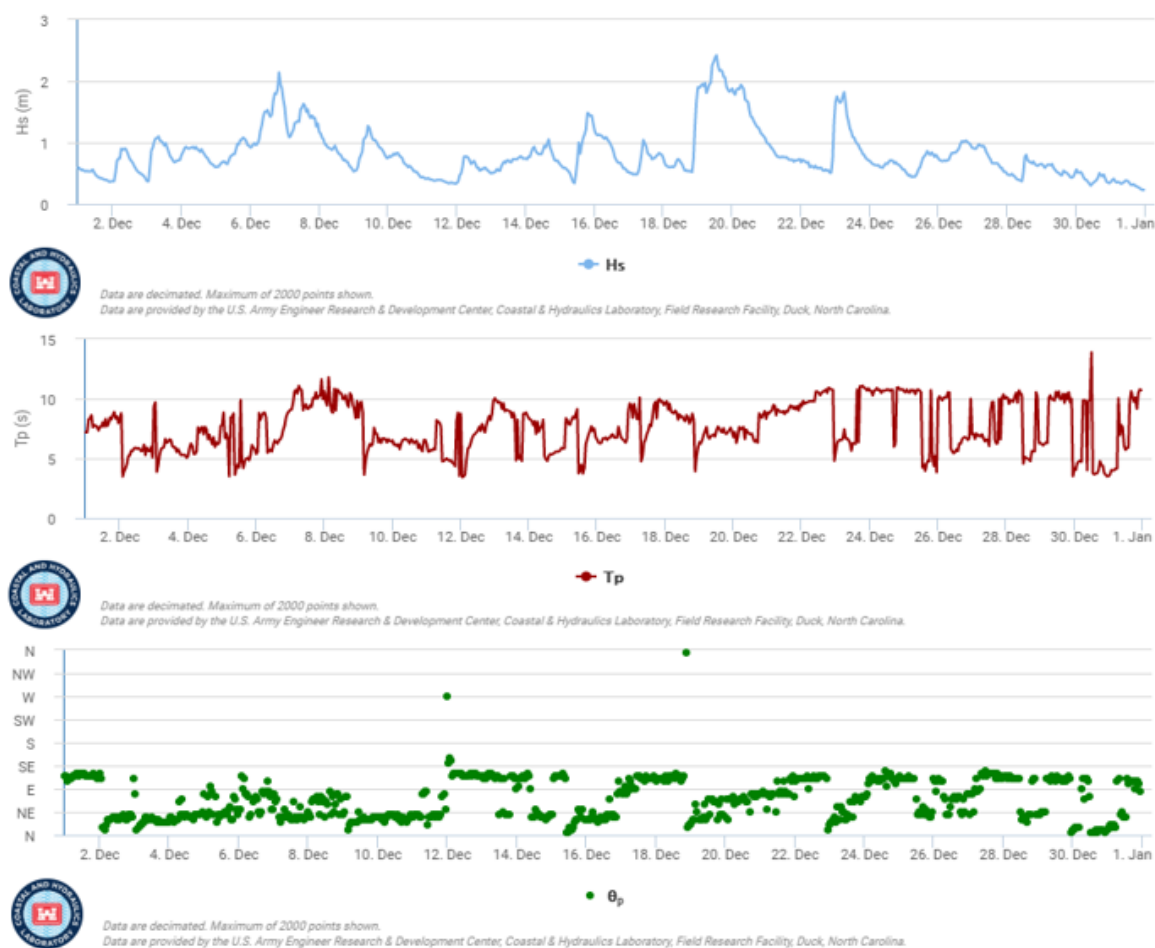


Figura 9. Series de tiempo en bruto de a Hs (m), Tp (s) y dirección Dir (°) para el sensor #1 obtenidas del portal del FRF.

Los registros en los sensores #2 y #4 representan el comportamiento de las variables del oleaje a medido que se va acercando a costa (véase Figura 10 y Figura 11). Al comparar ambos registros se puede observar claramente el inicio de un asomeramiento.



Figura 10. Serie de tiempo de Hs (m) para el 12/2016 en el sensor #2.

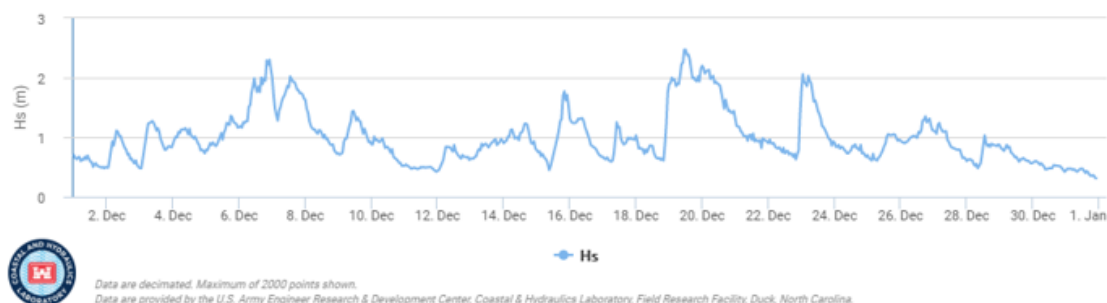


Figura 11. Serie de tiempo de Hs (m) para el 12/2016 en el sensor #4.

Los registros de corrientes en los sensores #2 y #3 son los únicos que estuvieron activos para la fecha del mes de diciembre del 2016. En la Figura 12 y Figura 13 se presentan las series de tiempo en bruto de los sensores #3 y #4.



Figura 12. Serie de tiempo de la velocidad de corriente (m/s) para el sensor #2.



Figura 13. Serie de tiempo de la velocidad de corriente (m/s) para el sensor #3.

La serie de tiempo para las velocidades de corrientes en el sensor #2 presenta algunos picos con corrientes por encima de 0.5 m/s. El sensor #3, el más cercano a la costa, presenta registros de corrientes hasta de 1 m/s.

Es importante mencionar que se cuenta también con un sensor adicional disponible a 11 m de profundidad, fuera del dominio de estudio pre-establecido; el cual, registró magnitudes de corriente de 0.6 m/s (ver Figura 14), similares a las registradas por el sensor #2. Estas corrientes pueden ser, a priori, de distinta naturaleza a las corrientes generadas por efecto de la rotura del oleaje, ya que, a 11 m de profundidad, no se espera que exista una clara rotura del oleaje, inclusive bajo condiciones de temporal. A partir de lo anterior, se intuye que los sensores de corriente que aporta a la campaña de campo puedan estar registrando una corriente proveniente de otro proceso físico alternativo, tales como corrientes de marea, corrientes litorales de gran escala, o incluso corrientes provenientes de alguna desembocadura. También se podría inferir que el post-proceso de promediado en vertical del perfil de corrientes no sea representativo de la corriente de rotura que aportan los modelos.

A este respecto, el presente TFM no pretende dilucidar la génesis de las corrientes ni su peso particular en las mediciones empleadas, simplemente pone de manifiesto esta circunstancia que, seguramente tendrá relevancia en el proceso de validación que se presenta posteriormente.



Figura 14. Serie de tiempo de la velocidad de corriente (m/s) para el sensor #3.

4.2. Resultados y análisis de sensibilidad de la herramienta XBeach

El dominio de la zona de estudio y los registros de los sensores presentados en la sección 5.1 han sido utilizados para el montaje y ejecución numérica de la herramienta XBeach en la zona de interés. Finalmente, los resultados del análisis de sensibilidad con base en la modificación del parámetro de fricción del fondo son presentados en esta sección.

4.2.1. Montaje Numérico

El montaje numérico sigue las recomendaciones y requisitos establecidos por el manual de la herramienta y presentadas en el capítulo 4.

Dominio y Mallado

Las coordenadas geográficas iniciales fueron transformadas para definir un dominio en coordenadas locales (trasladadas y rotadas), en donde el origen relativo se encuentra en (0,0). Una malla numérica con una resolución de (Dx=10m, Dy=10m) ha sido establecida sobre el dominio en rotado (Ver Figura 15).

Tal y como ya se mencionó anteriormente, el modelo XBeach no cuenta con una interfaz que permita con facilidad un montaje. No obstante, cuenta con un paquete de funciones “XBeach Matlab Toolbox” cuales facilitan este proceso mediante el sistema de cómputo numérico Matlab®.

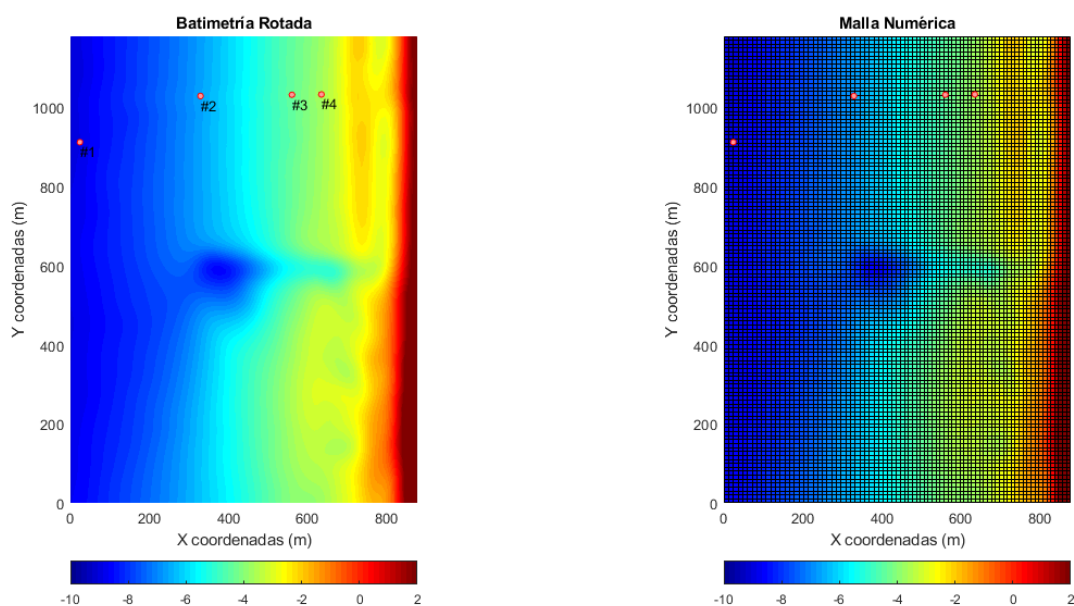


Figura 15. A la derecha el esquema de la batimetría rotada y a la izquierda la malla numérica para montaje del modelo XBeach.

Condiciones de Contorno

Evitando largos tiempos computacionales y laboriosos metodologías de pre y post proceso, se determinó escoger 10 estados de mar representativos del registro del sensor #1 (ver Figura 16 y Tabla

1). El criterio de selección se realizó con base en la identificación de diferentes combinaciones ente H_s (m), T_p (s) y Dir (°), buscando cubrir la casuística general del oleaje en la zona de estudio, para el mes de mediciones disponibles. Esta cantidad reservada de casos representativos permitió, en este TFM, flexibilidad a la hora de utilizar varias herramientas numéricas y analizar sus resultados.

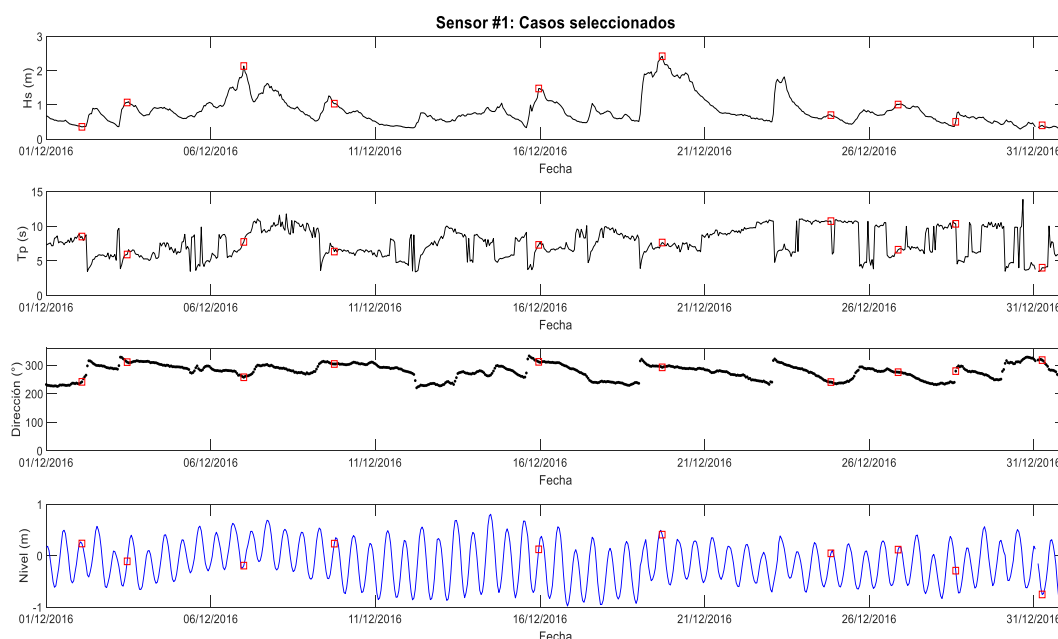


Figura 16. Series de tiempo de H_s (m), T_p (s), Dir (°) y Nivel (m) para el sensor #1 con los 10 casos seleccionados.

Tabla 2. Casos espectrales seleccionados para la ejecución de las herramientas numéricas.

Caso	H_s (m)	T_p (s)	Nivel (m)	Dir (°)	Gamma γ	Sigma σ	Fecha
1	0.36	8.5	0.2	241	3.3	20	2/12/26 – 2:00 am
2	1	6	-0.1	310	3.3	20	3/12/2016 – 11:00 am
3	2	7.7	-0.2	257	3.3	20	7/12/2016 – 00:00 am
4	1	6.35	0.24	304	3.3	20	9/12/2016 – 18:00 pm
5	1.5	7.3	0.12	311	3.3	20	15/12/2016 – 23:00 pm
6	2.4	7.65	0.4	292	3.3	20	19/12/2016 – 17:00 pm
7	0.7	10.75	0.04	240	3.3	20	24/12/2016 – 20:00 pm
8	1	6.6	0.11	275	3.3	20	26/12/2016 – 21:00 pm
9	0.5	10.4	-0.29	279	3.3	20	28/12/2016 – 15:00 pm
10	0.4	4	-0.75	317	3.3	20	31/12/2016 – 6:00 am

Parámetros Generales

La Tabla 3 presenta los parámetros de montaje del modelo establecidos en el fichero *params.txt* requerido por el modelo XBeach para ejecutar una simulación. Información adicional de los parámetros se encuentran en el manual de usuario y su portal de información (xbeach.readthedocs.io).

Tabla 3. Parámetros de montaje del modelo Xbeach (*params.txt*) con su descripción y valor utilizado.

Parámetros		Descripción	Valor usado
Mallado numérico	nx	Celdas numéricas en eje X	81
	ny	Celdas numéricas en eje Y	118
	thetamin	Limite direccional	-90
	thetamax	Limite direccional	90
	alfa	Ángulo del eje X respecto el Este	0
Tiempo modelo	tstop	Tiempo de duración de simulación	3600 s
	CFL	Máximo número de Courant para el cálculo	0.7
General	bedfriccoef	Coefficiente de fricción Chézy	55 m ^{1/2} /s
	wavemodel	Estacionario, Surbeat o No-hidroestatico	surfbeat
	single_dir	Refracción se resuelve de forma estacionaria, dirección promedio	1
	dtheta_s	Resolución direccional en caso de refracción estacionaria	10
Condiciones contorno	instant	Condición de contorno para oleaje	jons
	front	Contorno generador y absorbente en 2D	1
	left	Condición de contorno lateral	0='neumann'
	right	Condición de contorno lateral	0='neumann'
Modelo Roller rotura de oleaje	roller	Utilizar modelo <i>Roller</i>	1
	beta	Coefficiente de pendiente de rotura en modelo <i>Roller</i>	0.15
	break	Tipo de formulación de rotura	roelvink_daly
	gamma	Parámetro de rotura en formulación Roelvink	0.55
	alpha	Parámetro de disipación en formulación Roelvink	1
	n	A la potencia/ en función de probabilidad de rotura	10

4.2.2. Resultados

Para los resultados obtenidos, derivación del montaje numérico presentado anteriormente, se emplea un análisis comparativo entre los 10 estados de mar simulados y los registros reales de los tres sensores ubicados en el dominio.

Gráficos de dispersión tanto para la altura de ola significativa como para la velocidad de la corriente en el componente V “*longshore*” sirven como herramienta de verificación del modelo. Con el fin de valorar la bondad de ajuste entre los datos registrados por los sensores y el modelo empleado, se calculan estadísticos, tales como: BIAS, coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

En el panel izquierdo de la Figura 17 se presentan las series temporales de H_s registradas por los sensores 2 y 4, junto con los valores obtenidos con el modelo XBeach en las ubicaciones correspondientes (marcas azules), mientras que el panel derecho presenta el ajuste lineal de los resultados obtenidos con los registros de ambos sensores. Tal como se observa, para los sensores #2 y #4 se obtuvo una alta correlación entre el modelo y los registros con un coeficiente de determinación de 0.81 y 0.89, respectivamente. Concentrándose en los resultados obtenidos la ubicación más cercana a costa (sensor 4) se obtiene un error RMSE de 0.29 m con un BIAS negativo de 0.24 m.

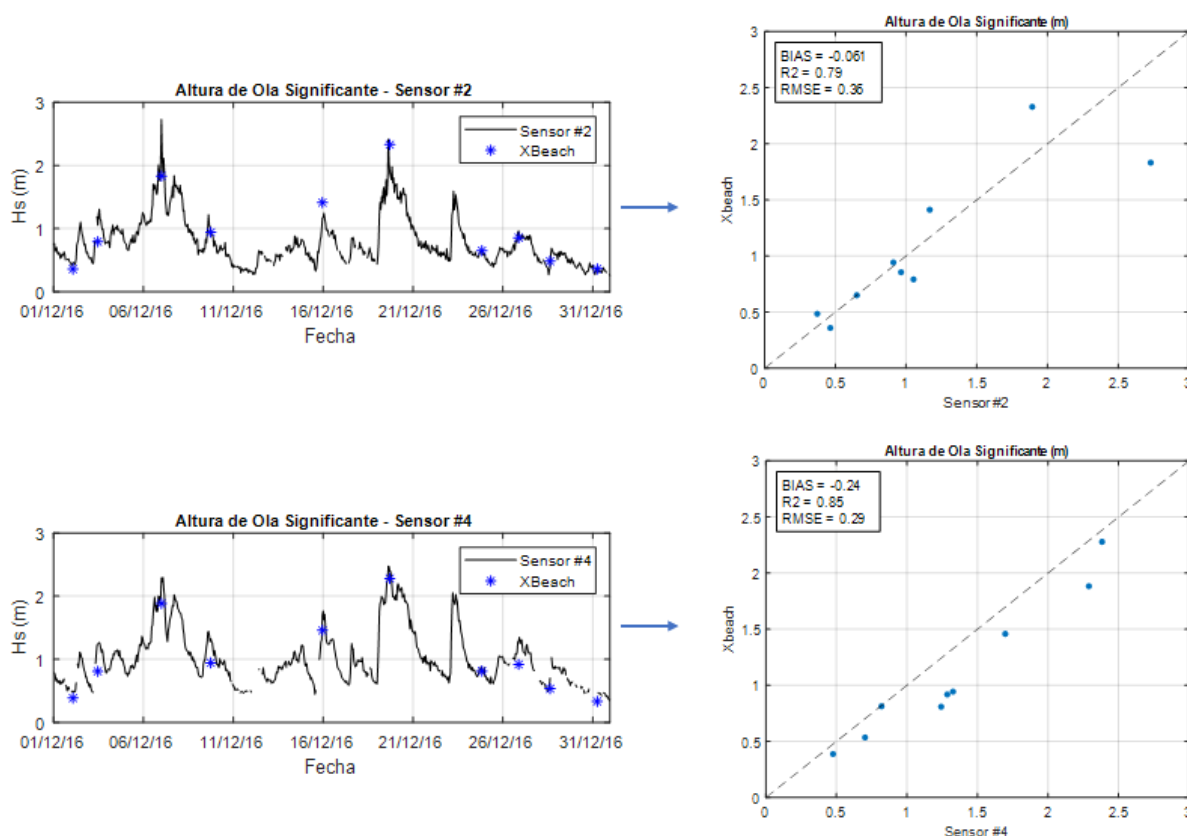


Figura 17. Resultados de H_s (m) obtenidos por XBeach ($\text{Chézy} = 55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) y estadísticos de validación para sensores #2 y #4.

En el panel izquierdo de la Figura 18 se presentan las series temporales de corrientes en la componente V “*alongshore*” registradas por los sensores 2 y 4, junto con los valores obtenidos con el modelo XBeach en las ubicaciones correspondientes (marcas rojas), mientras que el panel derecho presenta el ajuste lineal de los resultados obtenidos con los registros de ambos sensores. En la serie temporal del sensor

#2 se observa que el modelo no logra caracterizar las velocidades de la corriente en la respectiva zona. Mientras que para la ubicación del sensor #3, el modelo consigue simular las corrientes de flujo, reflejando un R2 de 0.67 con un error de 0.27 m entre la variabilidad total. Esta observación va acorde con lo anteriormente observado en las series temporales del Portal de FRF donde se contempla el posible registro de corrientes provenientes de otros procesos físicos alternativos.

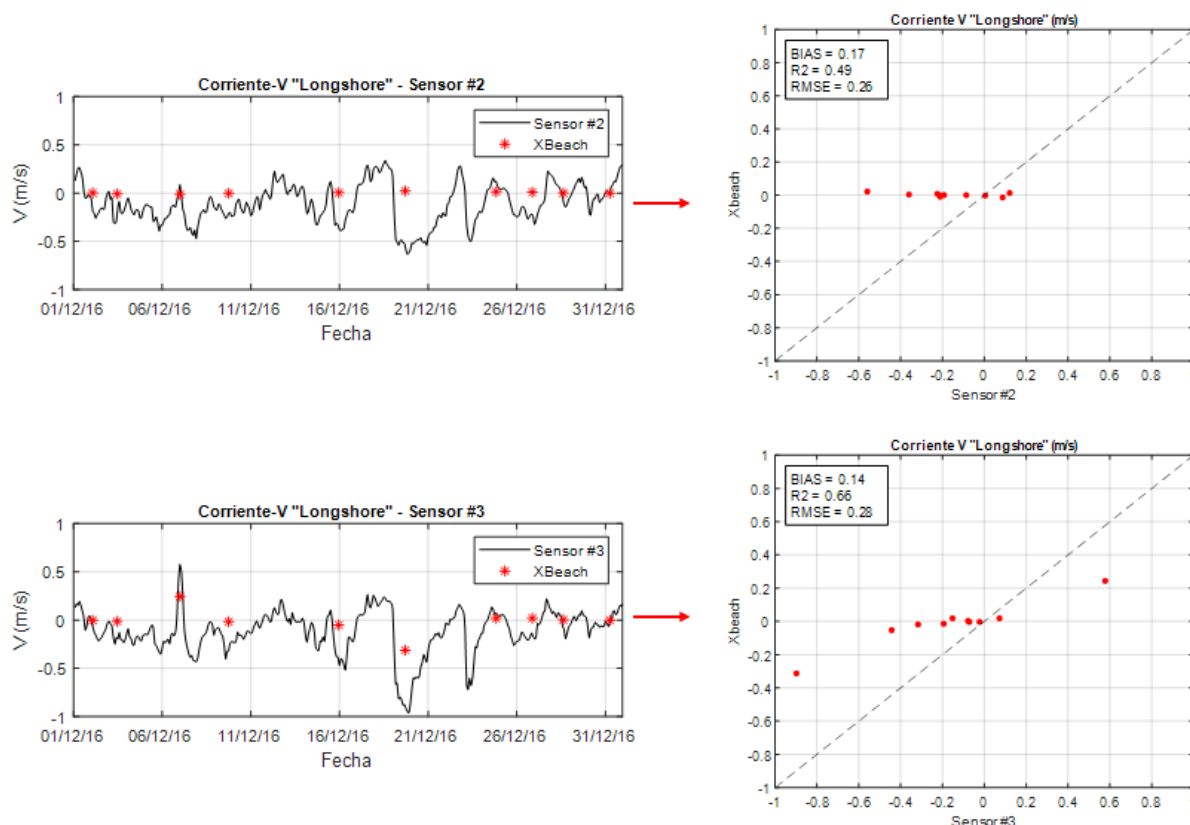


Figura 18. Resultados de corrientes V "Longshore" por XBeach ($\text{Chézy} = 55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) y estadísticos de validación respecto al sensor #3

La Figura 19 ilustra los mapas de oleaje y corrientes para el estado de mar más energético de los 10 casos experimentales, el Caso 6. El mapa de oleaje nos permite observar cómo el oleaje sufre cierta refracción a modo que va llegando a costa. De igual forma, se observa cómo la irregularidad batimétrica referente a la presencia del muelle interviene en la altura del oleaje. En el mapa de corrientes se puede observar cómo predomina un flujo de corrientes a lo largo de la costa, concentrado en el canal entre la barra morfológica y la línea de costa. El canal transversal ubicado en la zona central de dominio funciona como salida para el patrón de corrientes. Por último, se observa cómo el punto #3, ubicación del sensor 3, queda justo en el comienzo de un gradual de aumento en magnitudes de velocidades.

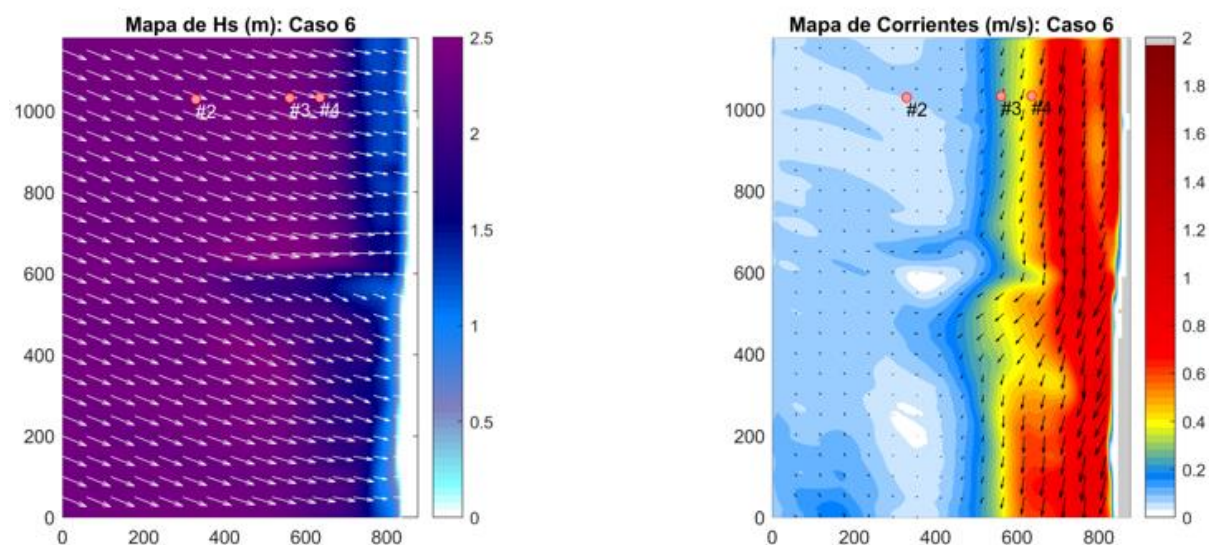


Figura 19. Mapas de oleaje H_s (m) obtenido por el modelo XBeach para el Caso 6.

Al analizar los resultados obtenidos en mapas se puede observar perfectamente la localización del flujo asociado a las corrientes. Dejando de manifiesto que el modelo numérico calcula la rotura del oleaje y la consiguiente creación de corrientes en una localización espacial que no es coincidente con lo que reflejan los sensores #2 y #3 (especialmente con el sensor #3, ya que el sensor #2 se encuentra a una profundidad que no permite la rotura del oleaje incluso en temporal). En el modelo numérico, el cálculo o simulación de rotura del oleaje se puede ajustar de diferentes formas: estableciendo un mallado numérico de mayor definición batimétrica y/o modificando los umbrales para desencadenar la rotura en los esquemas numéricos de dicho proceso físico y/o modificando la fricción por fondo presente en el dominio y otras.

Con la intención de intentar conseguir una representación más precisa de los registros reales, se determinó estudiar que tan sensible e inerte la herramienta numérica XBeach es, a cambios de variables del modelo. Por lo tanto, en el presente TFM se toma la decisión de dirigir el análisis de sensibilidad modificando el parámetro de fricción por fondo y manteniendo el resto del montaje igual, con la finalidad de comenzar a comprender el comportamiento de esta herramienta.

4.2.3. Análisis de Sensibilidad: XBeach

Con miras a una herramienta que aporte resultados robustos de la hidrodinámica en la zona de rompientes se emplea un análisis de sensibilidad alterando la fricción por fondo en el dominio de la playa experimento (Duck, Carolina del Norte). Un análisis de sensibilidad es una técnica utilizada para determinar como una variable independiente (en este caso la fricción) altera una variable dependiente (oleaje + corrientes) bajo un conjunto de supuestos.

La formulación de fricción por fondo establecida en el montaje de la herramienta XBeach está dada por el coeficiente de Chézy ($m^{1/2}/s$). Coeficiente utilizado en la formulación de Chézy para el cálculo de velocidad del agua en canales abiertos. Para el análisis de sensibilidad se establecieron coeficientes crecientes comenzando con el valor recomendado por el manual ($55 m^{1/2}/s$, $60 m^{1/2}/s$, $65 m^{1/2}/s$ y 70

$m^{1/2}/s$) buscando analizar la sensibilidad debido a la disminución de fricción por fondo de la herramienta.

Ya habiendo analizado los resultados obtenidos con un $C=55 m^{1/2}/s$ en la subsección anterior, se presentan los resultados de una simulación utilizando un $C=60 m^{1/2}/s$.

En el panel izquierdo de la Figura 20 se presentan las series temporales de H_s registradas por los sensores 2 y 4, junto con los valores obtenidos con el modelo XBeach en las ubicaciones correspondientes (marcas azules), mientras que el panel derecho presenta el ajuste lineal de los resultados obtenidos con los registros de ambos sensores. Tal como se observa, para los sensores #2 y #4 se obtuvo una alta correlación entre el modelo y los registros con un coeficiente de determinación de 0.81 y 0.89, respectivamente. Concentrándose en los resultados obtenidos la ubicación más cercana a costa (sensor 4) se obtiene un error RMSE de 0.29 m con un BIAS negativo de 0.24 m subestimando el oleaje de forma sistemática.

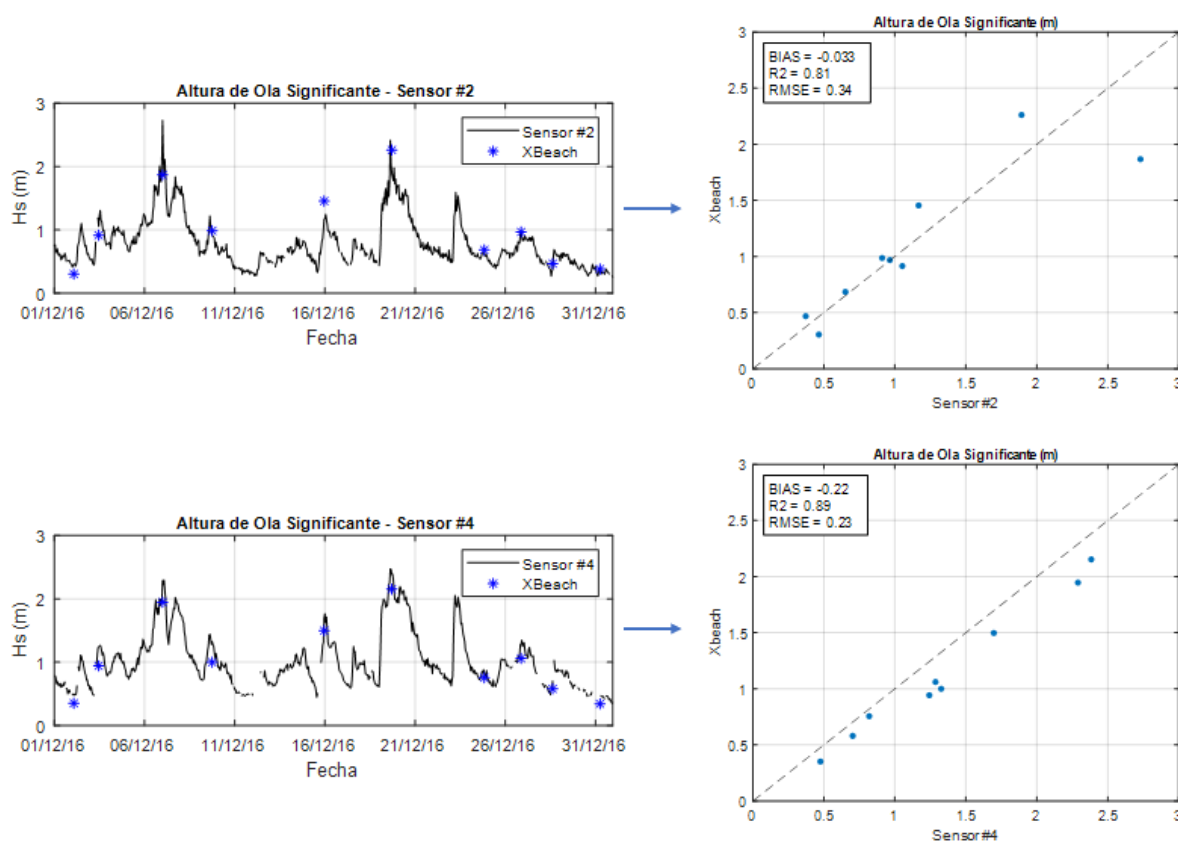


Figura 20. Resultados de H_s (m) obtenidos por XBeach ($Chezy = 60 m^{1/2}/s$) y estadísticos de validación respecto al sensor #4.

La Figura 21, estructurada igualmente que las figuras anteriores, muestra los resultados de las magnitudes de corrientes, componente V “longshore” en las ubicaciones correspondientes a los sensores #2 y #3. Los resultados obtenidos en la ubicación del sensor #2 mantiene un comportamiento similar a los resultados con un Chézy de $55 m^{1/2}/s$, el cual el modelo no logra simular presencia de magnitudes significativas de corrientes. Por otro lado, en la ubicación del sensor #3 se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.68 con un error RMSE de 0.28 m. Manteniendo similitud con los

resultados con un $C=55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, se observa como el modelo logra simular corrientes relacionadas a oleajes de mayor energía en la ubicación del sensor #3.

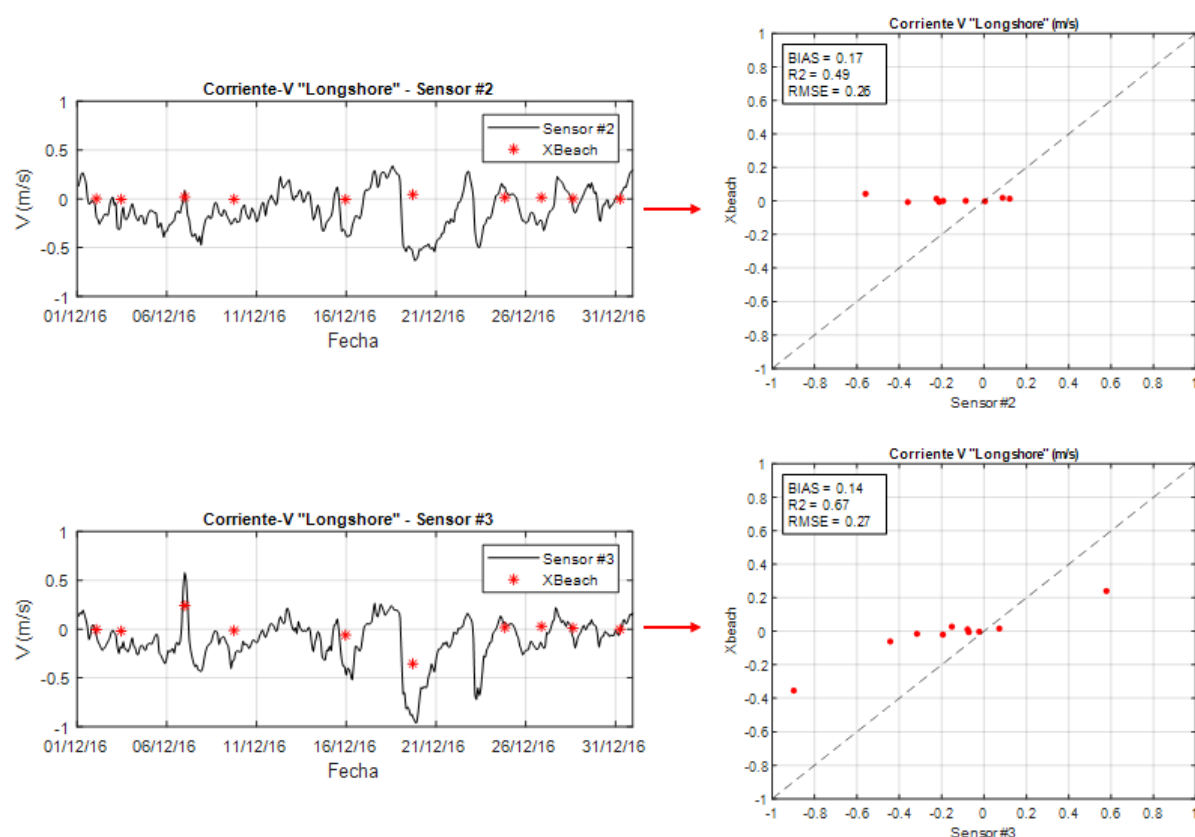


Figura 21. Resultados de corrientes V "Longshore" por XBeach ($\text{Chézy} = 60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) y estadísticos de validación respecto al sensor #3

Las series de tiempos y ajustes lineales por gráficos dispersión tanto para la altura de ola significativa como para la velocidad en el componente V "longshore" relacionados a los coeficientes de Chézy de $65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ y $70 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ se ubican en el Anejo 1 del TFM.

En la Tabla 4 se plasman los resultados obtenidos de altura ola Hs en las ubicaciones de los sensores #2 y #4. Se puede observar cómo a medida que se va cambiando el coeficiente de Chézy los resultados de Hs varían para ambas ubicaciones. Para el sensor #4, más cercano a costa, se obtienen mayor correlación y menor error que los resultados oleajes más al exterior.

Tabla 4. Análisis de Sensibilidad: resultados obtenidos de Hs por modelo XBeach.

Sensores	Fricción por fondo	Sensor #2			Sensor #4		
		BIAS	R2	RMSE	BIAS	R2	RMSE
Hs (m)	$C=55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	-0.05	0.81	0.34	-0.24	0.85	0.29
	$C=60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	-0.02	0.83	0.32	-0.22	0.89	0.23
	$C=65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	-0.03	0.85	0.3	-0.22	0.89	0.24
	$C=70 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	-0.04	0.86	0.29	-0.23	0.87	0.25

Los resultados estadísticos de velocidad de corrientes en el componente V “longshore” para las dos ubicaciones de la playa experimento se establecen en la Tabla 5. Resultados ubicados en el sensor #2 muestran una pobre bondad de ajuste con R2 menores o igual a 0.51. Para la mayoría de los coeficientes de Chézy los resultados se mantienen generalmente constantes. Un $C=70 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, valor alejado a lo recomendado, permitió obtener resultados de mayor bondad de ajuste y menor error RMSE.

Tabla 5. Análisis de Sensibilidad: resultados estadísticos obtenidos de corrientes “longshore” por modelo XBeach.

Sensores	Fricción por fondo	Sensor #2			Sensor #3		
		BIAS	R2	RMSE	BIAS	R2	RMSE
V (m/s)	$C=55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	0.17	0.49	0.26	0.14	0.66	0.28
	$C=60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	0.17	0.49	0.26	0.14	0.67	0.27
	$C=65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	0.17	0.50	0.26	0.15	0.66	0.28
	$C=70 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	0.16	0.51	0.25	0.13	0.73	0.23

4.3. Comparación con las otras herramientas

En esta sección se desarrolla un análisis comparativo entre herramientas numéricas ya utilizadas por el IHCantabria y la herramienta numérica de principal estudio, XBeach. Este análisis comparativo se rige en el principal objetivo del TFM: explorar la posibilidad de emplear una nueva estrategia numérica para el cálculo y cuantificación de los procesos de oleaje y corrientes de rotura en la zona de rompientes, con la idea de abrir una nueva alternativa para la cuantificación final del parámetro MSI en costa.

La comparación es basada en la obtención y validación de la altura de ola significativa y velocidad del componente V de corrientes para las mismas ubicaciones de sensores trabajadas anteriormente. El dominio de la zona de estudio y los datos de entrada se mantendrá igual y se utilizará el sistema de coordenadas locales establecido para el montaje numérico de XBeach. De esta forma, se busca mantener homogeneidad entre los tres montajes permitiendo una comparación más evidente.

Con el fin de comparar la perceptibilidad a cambios de variables (fricción) de XBeach con las otras dos herramientas, SWAN+SHORECIRC y OLUCA+COPLA, se emplea un análisis de sensibilidad debido a la alteración de fricción por fondo. De esta forma, se busca establecer una comparación entre las tres herramientas enfocándose en los resultados de procesos de oleaje y corrientes de rotura en la zona de rompientes.

4.3.1. SWAN + SHORECIRC

A continuación, se presenta el montaje de la herramienta utilizando la interfaz SOPROA v.2.0, así como los coeficientes de fricción utilizados en el análisis de sensibilidad. Resultados estadísticos de altura de

ola significativa y corrientes “longshore” son analizados con respecto a los registros proporcionados por los sensores #2, #3 y #4.

4.3.1.1. Montaje Numérico

La Figura 22 ilustra el montaje numérico a través de la interfaz desarrollada por el IHCantabria. Se ha establecido una malla general con una resolución de 20 metros mientras que la malla de detalle, estratégicamente ubicada en la zona de rompientes, va reduciendo su resolución conforme se aproxima a la costa. Las condiciones de contorno son declaradas en cada punto (color rosa) en los contornos laterales y exterior contiene los cuales serán interpolados en todo el contorno exterior del dominio numérico. Por último, el parámetro de fricción por fondo es modificado en la hoja interna de parámetros del modelo SHORECIRC.

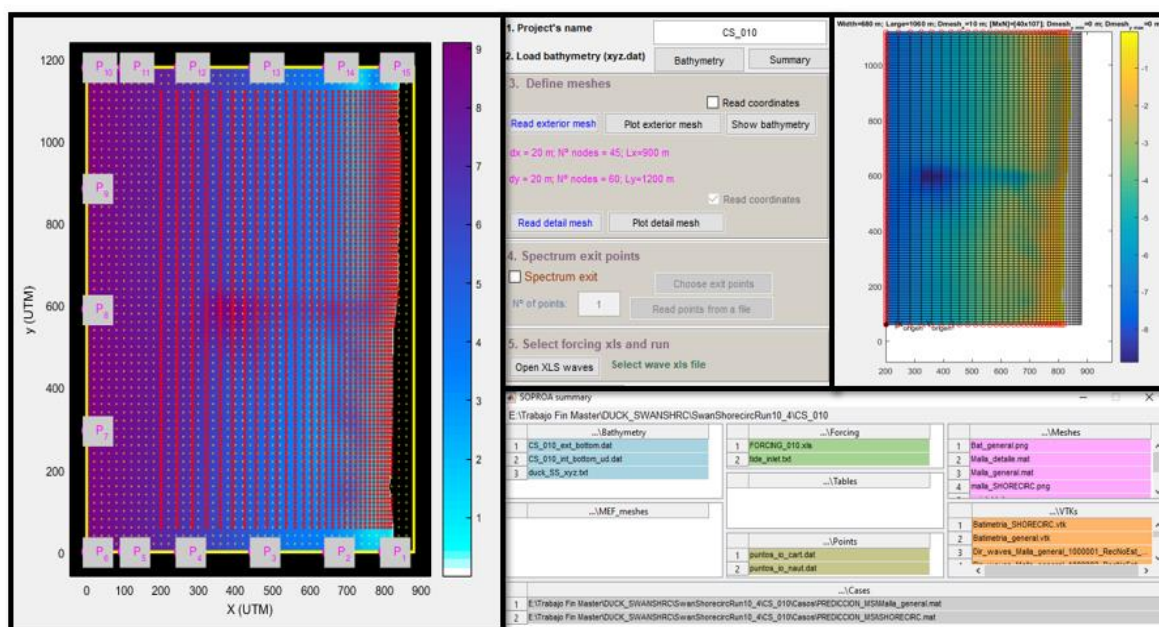


Figura 22. Resumen del montaje utilizando la interfaz de SOPROA.

4.3.1.2. Resultados y análisis de sensibilidad

En el esquema numérico del modelo numérico SHORECIRC, encargado de las corrientes, la fricción por fondo está regida por un coeficiente de fricción cuadrático (C_d). Manteniéndose dentro del rango de coeficientes recomendados por el manual ($0.005 \leq C_d < 0.03$), el análisis de sensibilidad se emplea con valores de 0.015, 0.01, 0.008 y 0.005.

Resultados de altura de ola significativa y velocidades en el componente V “longshore” han sido obtenidos correspondiente a cada alteración de fricción por fondo en el dominio. A continuación, se presentan los resultados obtenidos con coeficiente de fricción $C_d = 0.01$.

En el panel izquierdo de la Figura 23 se presentan las series temporales de H_s registradas por los sensores #2 y #4, junto con los valores obtenidos con el modelo XBeach en las ubicaciones

correspondientes (marcas azules), mientras que el panel derecho presenta el ajuste lineal de los resultados obtenidos con los registros de ambos sensores. Tal como se observa, para los sensores #2 y #4, el modelo refleja una bondad de ajuste robusta con coeficientes de determinación de 0.84 y 0.78, respectivamente. Concentrándose en los resultados obtenidos la ubicación más cercana a costa (sensor #4) se obtiene un error RMSE de 0.38 m con un BIAS negativo de 0.31 m subestimando el oleaje con una tendencia sistemática.

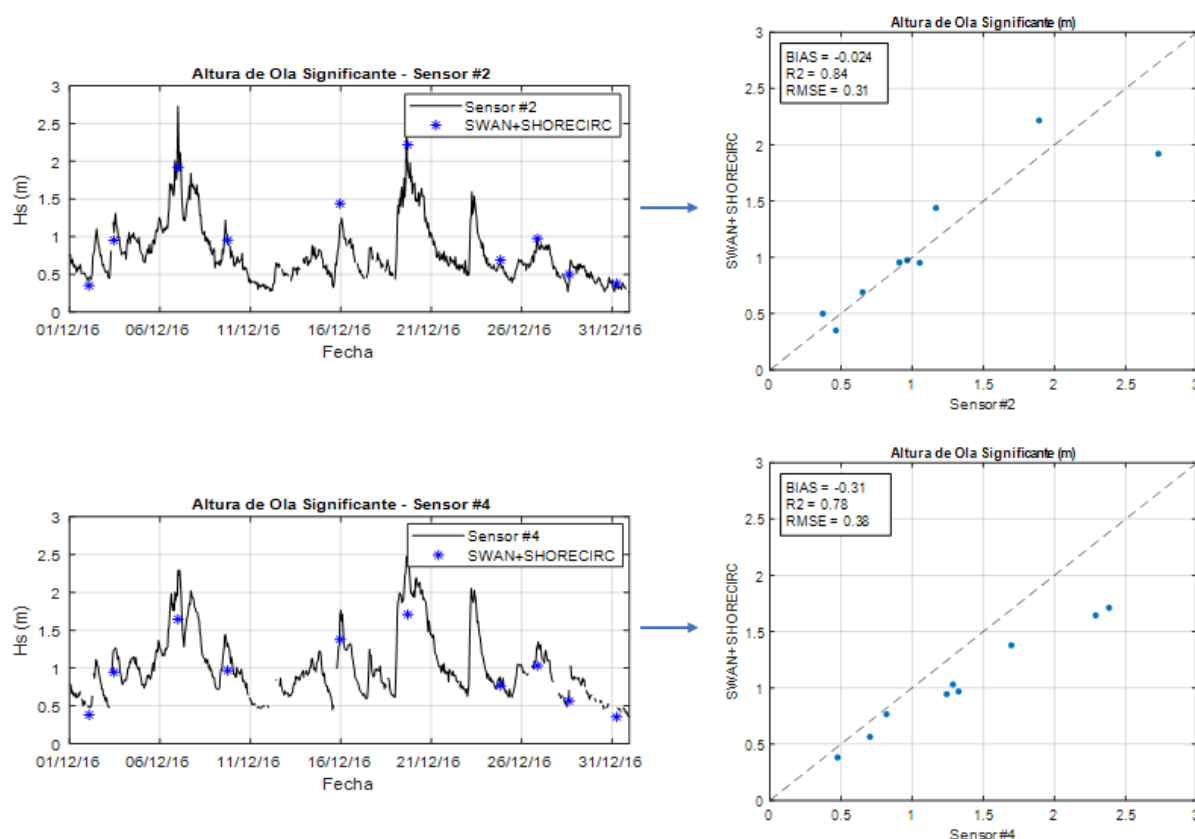


Figura 23. Resultados de H_s (m) obtenidos por SWAN+SHORECIRC ($C_d = 0.01$) y estadísticos de validación respecto al sensor #4

De igual manera, en la Figura 24 se observan los resultados de corrientes, componente V “alongshore” en las ubicaciones correspondientes a los sensores #2 y #3. Al igual que el modelo XBeach, la herramienta SWAN+SHORECIRC no representa las magnitudes de corrientes registradas por el sensor #2. En la serie de tiempo correspondiente al sensor #3, el más cercano a costa, se observa como el modelo comienza a reflejar corrientes en sus resultados. Las corrientes obtenidas por la herramienta se mantienen subestimadas y con resultados estadísticos moderados. Se obtuvo una bandada de ajuste moderada con valores de 0.52 respecto sensor #2 y 0.57 respecto sensor #3.

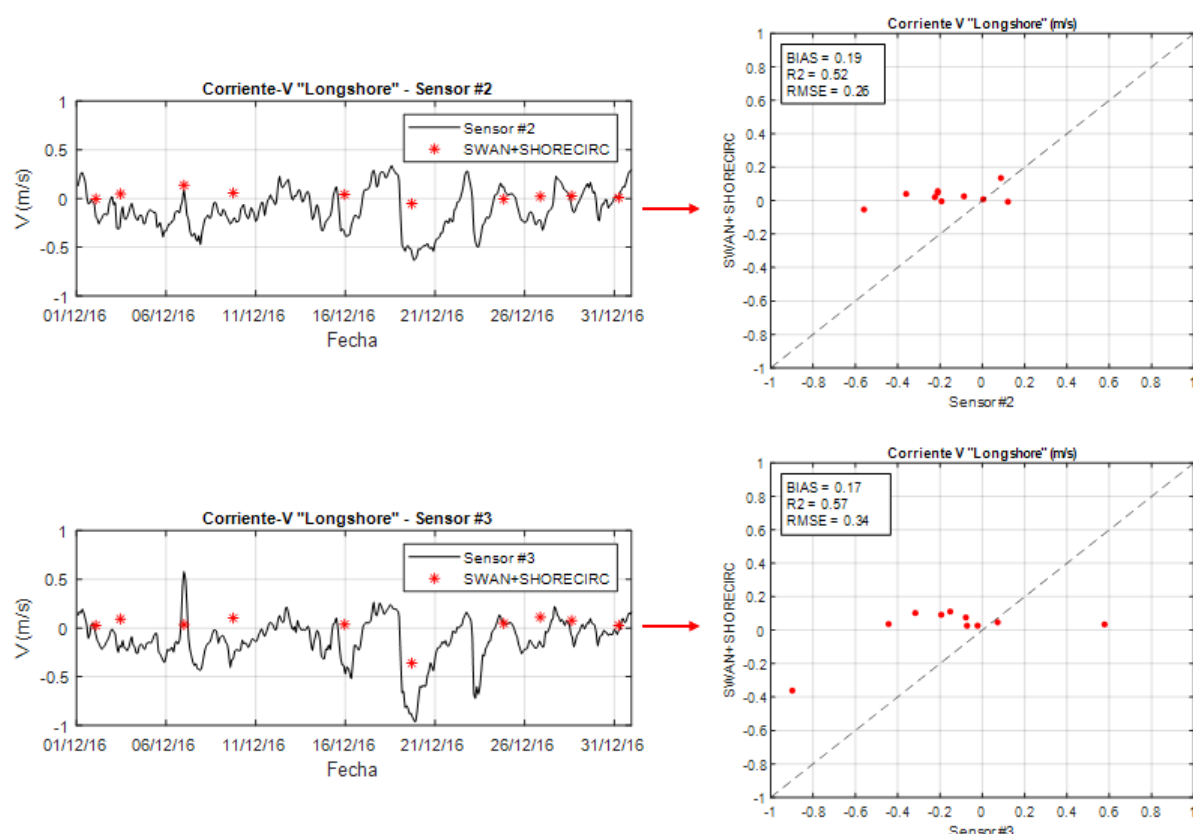


Figura 24. Resultados de corrientes V "Longshore" por SWAN+SHORECIRC ($C_d = 0.01$) y estadísticos de validación respecto al sensor #3.

Con la intención de analizar los resultados obtenidos referentes a las diferentes fricciones, figuras de serie de tiempo y gráficos de dispersión se establecen en el Anejo 1 del TFM.

En la Tabla 6 se encuentran los resultados estadísticos obtenidos de altura ola H_s en las ubicaciones de los sensores #2 y #4. Se puede observar cómo a medida que se va cambiando el coeficiente de fricción los resultados de H_s no sufren variación. Por otra parte, se observan mejores resultados en los oleajes más alejados a la costa con R^2 de 0.84 en comparación con el sensor #4 con R^2 de 0.78.

Tabla 6. Análisis de Sensibilidad: resultados obtenidos de H_s por herramienta SWAN+SHORECIRC.

Sensores	Fricción por fondo	Sensor #2			Sensor #4		
		BIAS	R2	RMSE	BIAS	R2	RMSE
H_s (m)	$C_d=0.015$	- 0.02	0.85	0.30	- 0.31	0.78	0.38
	$C_d=0.01$	-0.02	0.85	0.30	-0.31	0.78	0.38
	$C_d=0.008$	-0.02	0.85	0.30	-0.32	0.78	0.38
	$C_d=0.005$	-0.02	0.85	0.30	-0.32	0.78	0.38

Los resultados estadísticos de velocidad de corrientes en el componente V “*longshore*” para las dos ubicaciones de la playa experimento se establecen en la Tabla 7. Para ambos sensores, en el caso de los primeros tres coeficientes, se muestran resultados generalmente constantes a medida que va disminuyendo el coeficiente de fricción. Un $C_d=0.005$, valor mínimo en el rango recomendado, permitió obtener resultados de mayor bondad de ajuste y menor error RMSE.

Tabla 7. Análisis de Sensibilidad: resultados estadísticos obtenidos de corrientes “*longshore*” por modelo SWAN+SHORECIRC.

Sensores	Fricción por fondo	Sensor #2			Sensor #3		
		BIAS	R2	RMSE	BIAS	R2	RMSE
V (m/s)	$C_d=0.015$	0.19	0.49	0.28	0.19	0.54	0.37
	$C_d=0.01$	0.19	0.52	0.26	0.17	0.57	0.34
	$C_d=0.008$	0.19	0.55	0.25	0.16	0.59	0.33
	$C_d=0.005$	0.18	0.61	0.21	0.14	0.68	0.26

4.3.2. OLUCA + COPLA

A continuación, se presenta el montaje de la herramienta utilizando la *suite* Sistema de Modelado Costero (SMC), así como los parámetros de rugosidad relacionados con la fricción por fondo utilizados en el análisis de sensibilidad. Resultados estadísticos de altura de ola significativa y corrientes “longshore” son analizados con respecto a los registros proporcionados por los sensores #2, #3 y #4.

4.3.2.1. Montaje Numérico

La Figura 25 ilustra un resumen del montaje del dominio de estudio en el SMC en orden de obtener resultados de propagación de oleaje por OLUCA y patrones de flujo por COPLA. Debido al tamaño del dominio se ha establecido solo una malla numérica con una resolución de 10 m con el eje X perpendicular a la costa. La interfaz permite al usuario establecer una **Cola de cálculo** en donde establecen los estados de mar que se interesan ejecutar en la herramienta.

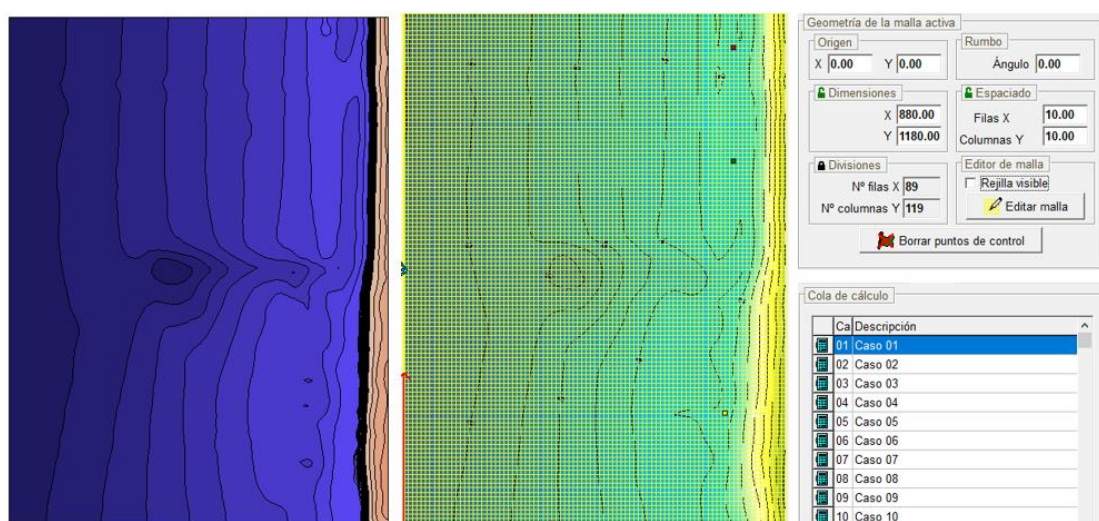


Figura 25. Resumen de montaje utilizando la suite SMC-MOPLA.

4.3.2.2. Resultados: Análisis de sensibilidad

En el esquema numérico del modelo numérico COPLA, encargado de las corrientes, utiliza la rugosidad efectiva K_{swc} para evaluar el coeficiente de rugosidad de Chézy ($m^{1/2}/s$) dada por:

$$c(x, y, t) = 18 \log \left(\frac{12H}{K_{swc}} \right)$$

Donde $K_{swc} = K_s + K_{sf}$

K_s = es la rugosidad asociada al tamaño de los sedimentos del fondo.

K_{sf} = es la rugosidad asociada a las formas del lecho.

La teoría del manual le propone al usuario un rango recomendado de ($0.0 < K_{swc} \leq 2.0$), definiendo por defecto una rugosidad hidráulica de $K_{swc} = 1.0$ m. Por lo tanto, el análisis de sensibilidad se llevó a cabo estableciendo directamente a través de la interfaz valores de K_{swc} de 1m, 0.5m y 0.1m.

Resultados de altura de ola significativa y velocidades en el componente V “longshore” han sido obtenidos correspondiente a cada alteración de fricción por fondo en el dominio. A continuación, se presentan los resultados obtenidos estableciendo la rugosidad hidráulica por defecto $K_{swc} = 1.0$ m.

En el panel izquierdo de la Figura 26 se presentan las series temporales de H_s registradas por los sensores #2 y #4, junto con los valores obtenidos con el modelo XBeach en las ubicaciones correspondientes (marcas azules), mientras que el panel derecho presenta el ajuste lineal de los resultados obtenidos con los registros de ambos sensores. Tal como se observa, para los sensores #2 y #4, el modelo refleja una bondad de ajuste robusta con coeficientes de determinación de 0.84 y 0.82, respectivamente. Concentrándose en los resultados obtenidos la ubicación más cercana a costa (sensor #4) se obtiene un error RMSE de 0.29 m con un BIAS negativo de 0.32 m subestimando el oleaje con una tendencia sistemática.

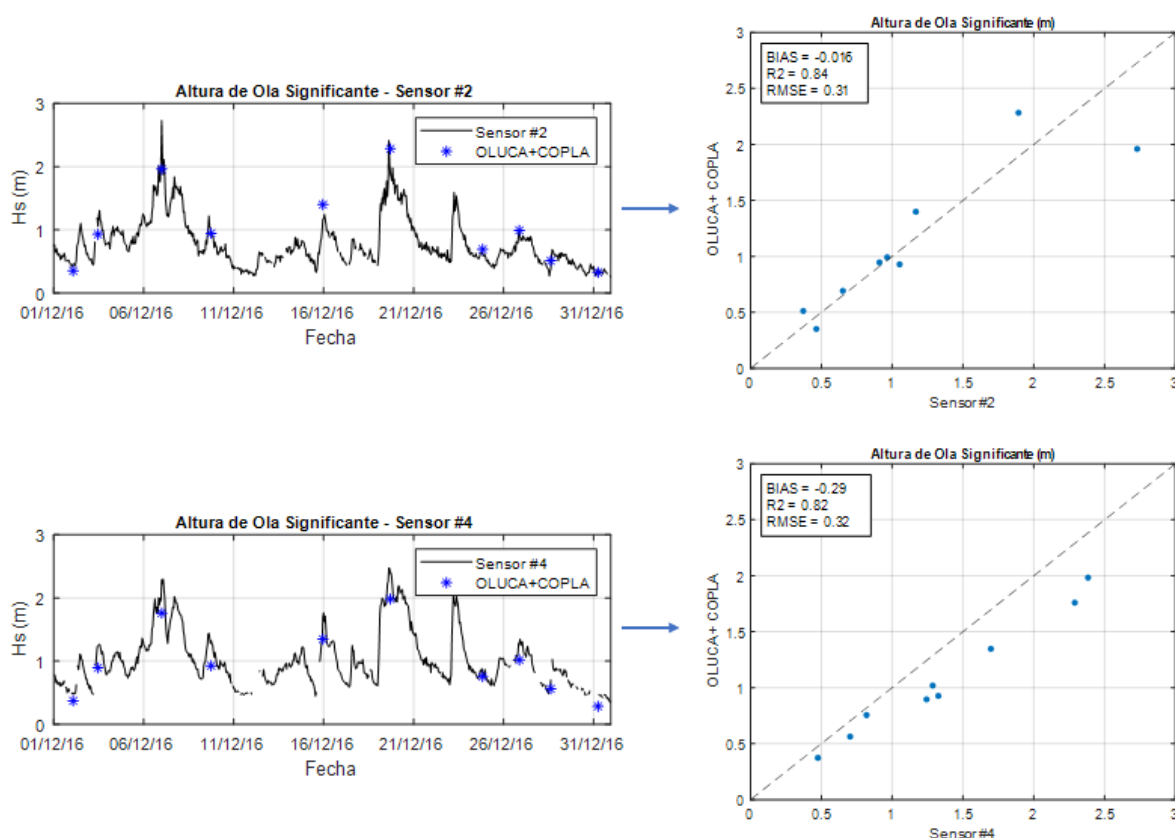


Figura 26. Resultados de H_s (m) obtenidos por OLUCA+COPLA ($K_{swc} = 1.0$ m) y estadísticos de validación respecto al sensor #4.

La Figura 27, estructurada igualmente que las figuras anteriores, muestra los resultados de las magnitudes de corrientes, componente V “longshore” en las ubicaciones correspondientes a los sensores #2 y #3. Los resultados obtenidos para ambos sensores demuestran leve bondad de ajuste manteniendo las magnitudes de las velocidades cercanas a 0.00 m/s.

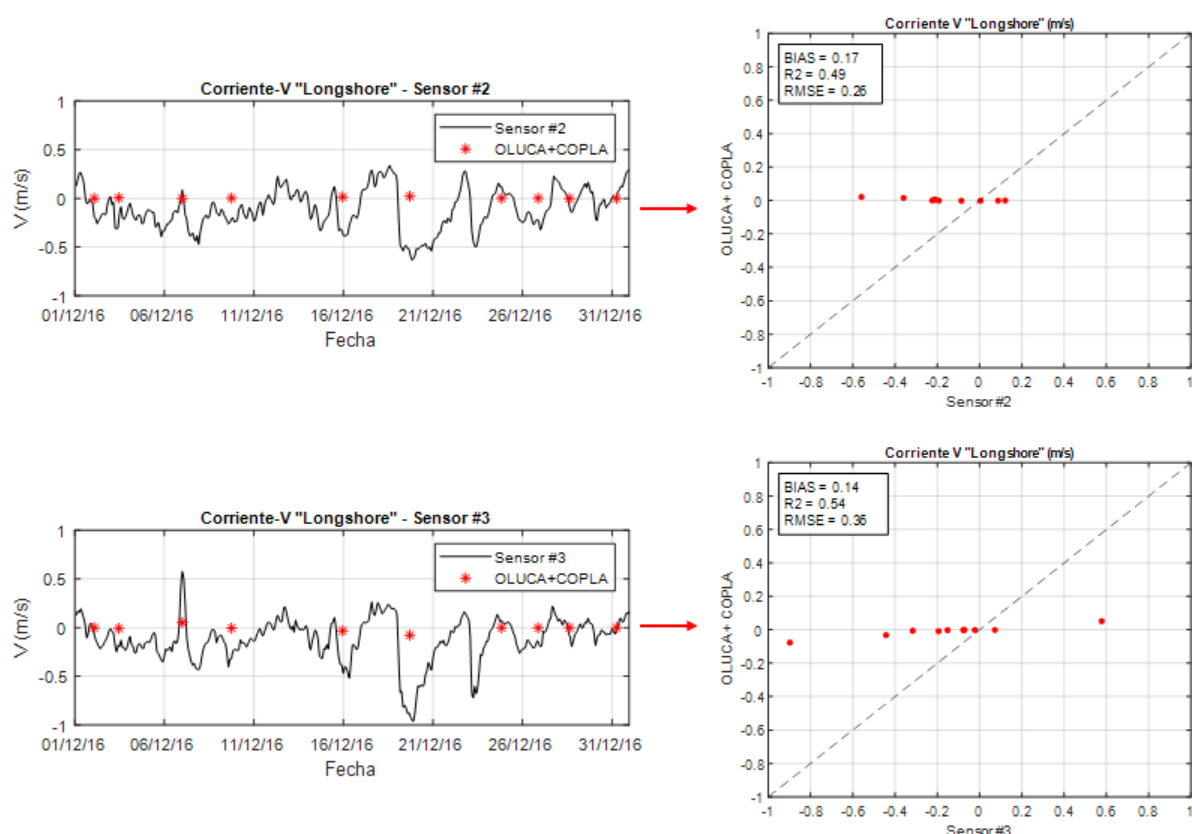


Figura 27. Resultados de corrientes V "Longshore" por OLUCA+COPLA ($K_{swc}=1.0$ m) y estadísticos de validación respecto al sensor #3.

Las series de tiempos y ajustes lineales por gráficos dispersión tanto para la altura de ola significativa como para la velocidad en el componente V "longshore" relacionados a una rugosidad hidráulica K_{swc} de 0.5 m y 0.1 m se encuentran en el Anejo 1 del TFM.

En la Tabla 8 se plasman los resultados obtenidos de altura ola H_s en las ubicaciones de los sensores #2 y #4. Se puede observar cómo no ocurren cambios en los resultados de H_s debido a la modificación de la rugosidad en el dominio. Manteniéndose valores de coeficientes de determinación robustos para las tres alteraciones en la fricción del dominio.

Tabla 8. Análisis de Sensibilidad: resultados obtenidos de H_s por herramienta OLUCA+COPLA.

Sensores	Fricción por fondo	Sensor #2			Sensor #4		
		BIAS	R2	RMSE	BIAS	R2	RMSE
H_s (m)	$K_{swc}=1.0$ m	-0.015	0.86	0.29	-0.29	0.82	0.32
	$K_{swc}=0.5$ m	-0.015	0.86	0.29	-0.29	0.82	0.32
	$K_{swc}=0.1$ m	-0.015	0.86	0.29	-0.29	0.82	0.32

Los resultados estadísticos de velocidad de corrientes en el componente V “longshore” para las dos ubicaciones de la playa experimento se establecen en la Tabla 9. Para las ubicaciones de ambos sensores el modelo COPLA no sostiene una bondad de ajuste parcialmente baja con coeficientes de determinación de 0.49 para el sensor #2 y 0.54 para el sensor #4. Por otro lado, no se observa variación en los resultados de corrientes al alterar la rugosidad por consiguiente la fricción en el dominio de estudio.

Tabla 9. Análisis de Sensibilidad: resultados estadísticos obtenidos de corrientes “longshore” por modelo OLUCA+COPLA

Sensores	Fricción por fondo	Sensor #2			Sensor #3		
		BIAS	R2	RMSE	BIAS	R2	RMSE
V (m/s)	Kswc=1.0 m	0.17	0.49	0.26	0.14	0.54	0.36
	Kswc=0.5 m	0.17	0.49	0.26	0.14	0.54	0.36
	Kswc=0.1 m	0.17	0.49	0.27	0.14	0.54	0.35

4.4. Conclusiones comparativas

Los resultados del análisis de sensibilidad permiten: estudiar cuan perceptibles son las tres herramientas numéricas a cambios en variables mediante el montaje numérico, analizar los resultados con los registros reales de la playa experimento y comparar los datos de salidas con miras al ejercicio de un desembarco anfibio.

La Tabla 10 presenta un resumen de los estadísticos de validación obtenidos en el análisis de sensibilidad correspondientes al sensor más cercano a la zona de rompientes. Referente a la representación numérica de altura de ola significativa (H_s), se obtiene un error RMSE menor en los resultados obtenidos con la herramienta XBeach. Se observa que tanto para SWAN+SHORECIRC como para OLUCA+COPLA, los resultados de altura de ola significativa no sufren apenas alteraciones al modificar la fricción por fondo. Dicha observación se puede relacionar a que ambas herramientas se constituyen por un acoplamiento entre un modelo de propagación de oleaje (H_s) y un modelo de flujo (Corrientes), también llamado “one-way coupling”, a diferencia del Xbeach que es una herramienta “two-way coupling” donde todos los modelos se encuentran numéricamente interconectados. Los resultados presentan una mayor bondad de ajuste R2 para los oleajes del modelo XBeach, siguiéndole por los resultados de OLUCA y, por último, los obtenidos por el modelo SWAN.

En cuanto a las corrientes “longshore”, XBeach sostiene un mayor coeficiente de determinación catalogándose como la herramienta con mayor bondad de ajuste a las corrientes medidas por los sensores. La herramienta SWAN+SHORECIRC provee resultados moderadamente aceptables para los primeros tres coeficientes de fricción. Por otra parte, al utilizar un $C_d=0.005$, valor mínimo recomendado por el manual, el modelo salta con resultados de mayor magnitud presentando mejoras en los estadísticos. Por otra parte, se observa como OLUCA+COPLA no sufre cambios significativos en las corrientes al modificarle la rugosidad Kswc.

Tabla 10. Resumen de resultados estadísticos de análisis de sensibilidad para las tres herramientas numéricas.

Herramienta Numérica	Fricción por fondo	Altura de ola significativa (m) / Sensor #4			Corrientes componente V (m/s) / Sensor #3		
		BIAS	R2	RMSE	BIAS	R2	RMSE
XBeach	C=55 m ^{1/2} /s	-0.24	0.85	0.29	0.14	0.66	0.28
	C=60 m ^{1/2} /s	-0.22	0.89	0.23	0.14	0.67	0.27
	C=65 m ^{1/2} /s	-0.22	0.89	0.24	0.15	0.66	0.28
	C=70 m ^{1/2} /s	-0.23	0.87	0.25	0.13	0.73	0.23
SWAN+SHORECIRC	C _d =0.015	-0.31	0.78	0.38	0.19	0.54	0.37
	C _d =0.01	-0.31	0.78	0.38	0.17	0.57	0.34
	C _d =0.008	-0.32	0.78	0.38	0.16	0.59	0.33
	C _d =0.005	-0.32	0.78	0.38	0.14	0.68	0.26
OLUCA+COPLA	K _{swc} =1.0 m	-0.29	0.82	0.32	0.14	0.54	0.36
	K _{swc} =0.5 m	-0.29	0.82	0.32	0.14	0.54	0.36
	K _{swc} =0.1 m	-0.29	0.82	0.32	0.14	0.54	0.35

Con miras a la obtención del criterio de desembarco MSI para la playa experimento, se comparan los resultados de salidas en el dominio total, mapas de oleaje y corrientes, con los montajes finales para las herramientas XBeach, SWAN+SHORECIRC y OLUCA+COPLA. La selección del coeficiente de fricción para cada modelo se justifica en el análisis de los estadísticos obtenidos y la coherencia descriptiva del entorno físico de la playa experimento.

Para la herramienta XBeach, se ha establecido un coeficiente de Chézy de 60 m^{1/2}/s debido a los resultados estadísticos anteriormente analizados y buscando mantener un coeficiente cercano al recomendado por el manual C=55 m^{1/2}/s. El montaje de la herramienta SWAN+SHORECIRC a utilizarse contempla un coeficiente cuadrático de C_d=0.01 igualmente buscando mantenerse en un valor medio en el rango recomendado ya que un C_d=0.005 reflejó mejores resultados, pero se encuentra en el límite de dicho rango. Por último, para la herramienta OLUCA+COPLA, debido a que no sufre cambios significativos al cambio de rugosidad hidráulica, se mantiene el montaje con el valor por defecto K_{swc}=1.0 m. Para conocimientos más certeros en los coeficientes de fricción se deben realizar campañas de campo y estudios que permita obtener parámetros de fricción óptimos.

Mapas Oleaje – Corrientes: Caso 3

En la Figura 28 se muestran los mapas de oleaje Hs y corrientes, post-procesados para las tres herramientas, correspondientes al estado de mar Caso 3. Referente a la altura de ola significativa, se observa mayores magnitudes en para XBeach y para OLUCA, sobre todo cerca de la zona de rompiente

con mayores concentraciones de altura de olas, en comparación con la altura de ola para SWAN. Por otra parte, los patrones de corrientes para las tres herramientas se comportan similar con la distinción de variabilidad de magnitudes entre ellas. Recalcando los resultados estadísticos presentados anteriormente, la herramienta XBeach presenta la mayor magnitud de corrientes mientras que OLUCA+COPLA mantiene unas velocidades menores.

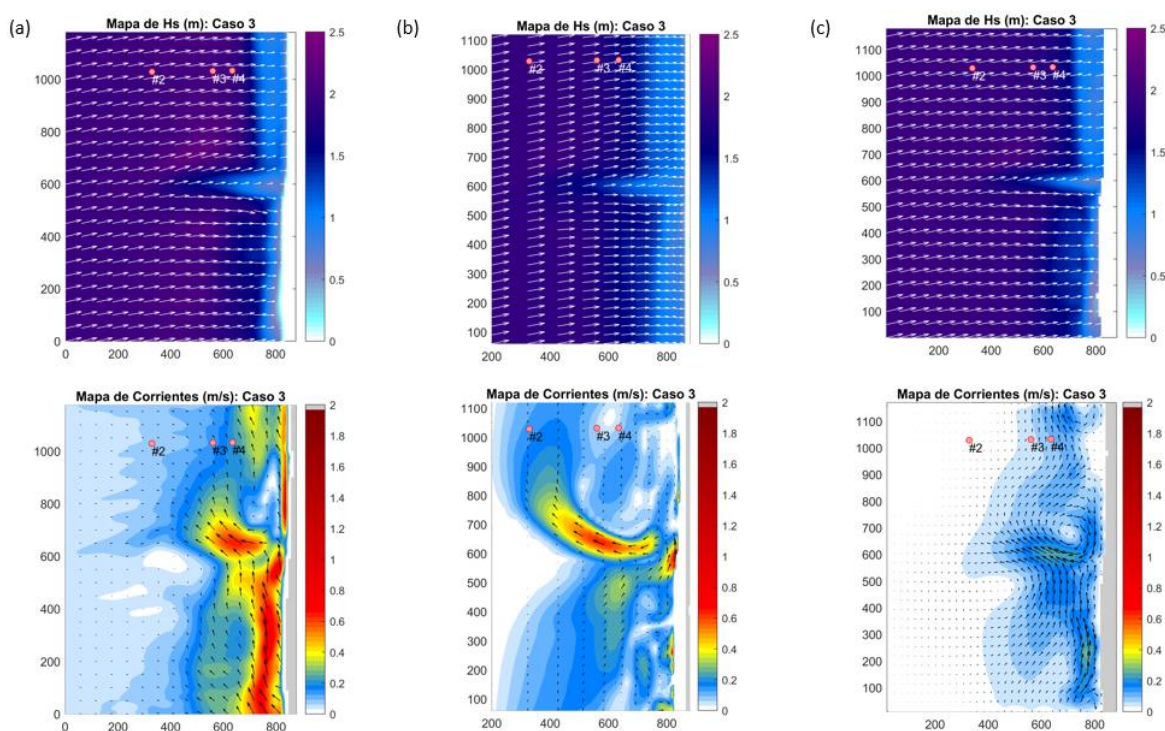


Figura 28. Mapas de oleaje y corrientes para (a) XBeach, (b) SWAN+SHORECIRC y (c) OLUCA+COPLA referentes al Caso 3.

Mapas Oleaje – Corrientes: Caso 6

Al igual que la figura anterior, la Figura 29 ilustra los mapas de oleaje y corrientes correspondientes al estado de mar Caso 6, descrito como el estado de temporal. Similar al Caso 3 se puede observar mayor magnitud de oleaje para las herramientas Xbeach y OLUCA que para SWAN. En cuanto a las corrientes, se observan patrones similares descritos por una corriente “longshore” predominante de Norte a Sur. La herramienta SHORECIRC presenta un patrón de corrientes más detallado y realista en la zona entre rompientes y línea de costa. Por otra parte, la herramienta Xbeach, aunque muestra mayor magnitud de corrientes, no representa un patrón de flujo realista y establece toda la zona de rompientes con una mancha de magnitud constante.

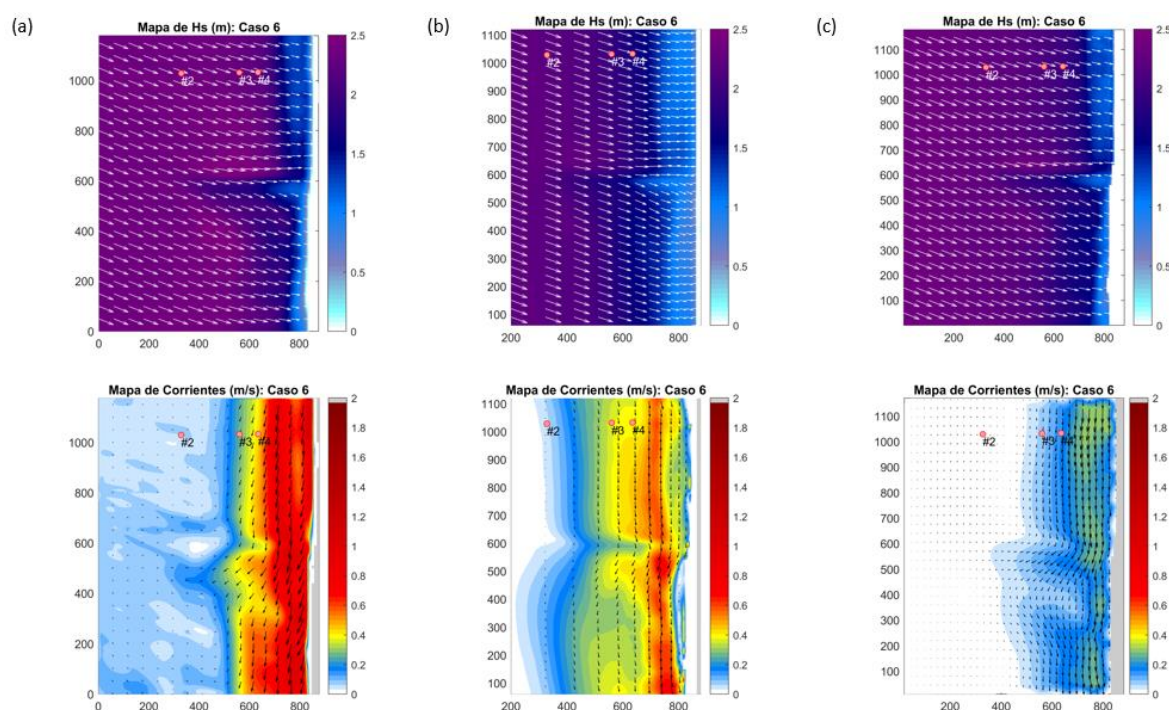


Figura 29. Mapas de oleaje y corrientes para (a) XBeach, (b) SWAN+SHORECIRC y (c) OLUCA+COPLA referentes al Caso 6.

Las comparaciones en este capítulo han constado en los resultados de altura de ola significativa y las velocidades de corrientes litorales presentes en la zona de rompientes en una playa experimento. Se ha observado fluctuaciones cualitativas y cuantitativas en los resultados de estos procesos físicos dependiendo de la herramienta empleada. Por lo tanto, debido a la relación directa que tiene H_s y las velocidades de corrientes con el cálculo del criterio de desembarco MSI se espera variabilidad en el criterio dependiendo de la herramienta numérica.

En la Tabla 11 se determina una medida comparativa, mayor cantidad de estrellas mejor, con el fin de cuantificar las observaciones y resultados obtenidos en el presente capítulo. Los parámetros de comparación estipulados: montaje, tiempo computacional, propagación de oleaje y corrientes están enfocados en la aplicación de las herramientas para el cálculo del criterio de desembarco MSI.

Tabla 11. Comparación basada en los obtenido en los resultados del análisis de sensibilidad.

Herramientas Numéricas	Parámetros de Comparación			
	Montaje	Tiempo Computacional	Propagación de Oleaje	Corrientes
XBeach	★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★
SWAN+SHORECIRC	★ ★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★ ★
OLUCA+COPLA	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★	★ ★ ★

5. CÁLCULO DEL CRITERIO DE DESEMBARCO (MSI)

En este capítulo se presenta un diagnóstico general del modelo XBeach, al igual que las otras dos herramientas analizadas, en el cálculo del parámetro *Modified Surf Index* (MSI) para el desembarco anfibio. Comparaciones y conclusiones han sido optadas con base a los resultados obtenidos y la fiabilidad de cada una de las herramientas.

5.1. Criterios funcionales para el desembarco anfibio

El índice MSI se cataloga como un número adimensional obtenido por una suma aritmética con base a los parámetros físicos presentes en la zona de rompientes/ *surf-zone*. Mencionado en la introducción del TFM el MSI se encuentra directamente relacionado a: la altura de ola significativa (H_s) en rotura, el tiempo entre olas rompientes sucesivas caracterizado a través del periodo medio (T_m), ángulo relativo entre ola rompiente y la costa, tipo de rotura, velocidad de corrientes “longshore” y a la magnitud y dirección del viento presente.

Los parámetros físicos mencionados podrían ser obtenido por un reporte de observaciones in-situ llamado *SUROB* o por informes de pronósticos de mayor precisión de la zona de rompientes. El índice se calcula mediante una tabla (hoja de cálculo) en la cual cada parámetro físico en rompientes (*SURF REPORT ITEM*) se le aplica una modificación dando resultado a un valor de entra (*ENTRY*) (Ver Tabla 12). La suma aritmética de cada de entrada (peso) en la hoja de calculo provee el criterio de desembarco MSI.

Tabla 12. Hoja y tabla de cálculo para establecer el MSI (Fuente: *Aerographers Mate, Modile 02-Miscellaneous Observations and Codes*)

SUROB / SURFCAST NO. 5: VALID TIME: 2200Z - RED BEACH		
SURF REPORT ITEM	MODIFICATION	ENTRY
SIG BREAKER HT (ALFA) 4.5 FT	No modification, enter significant breaker height.	+4.5
BREAKER PERIOD (CHARLIE) 7 SEC	Enter value from breaker period modification table (table 4-2).	+1.6
BREAKER TYPE (DELTA) 70% SPILLING 30% PLUNGING 0% SURGING (see note below)	NO ENTRY FOR 100% PLUNGING SURF. Enter only a value for the percent spilling surf or the percent surging surf from the breaker type modification tables (table 4-3).	-2.8
BREAKER ANGLE (ECHO) 15 DEG	Enter modification value from the breaker angle modification table (table 4-4) as value (A)= 2.4.	Enter only greater value, (A) or (B) +2.7
LITTORAL CURRENT (FOXTROT) 0.9 KT	Enter modification value from the littoral current modification table (table 4-5) as value (B)= 2.7	
RELATIVE WIND (HOTEL) 15 kt at 35 DEG ONSHORE	Enter the value from the wind modification table (table 4-6).	+0.5
SECONDARY SIG BREAKER No HT (HOTEL-ALFA) OFT	modification, enter secondary significant breaker height.	0
(add all entries) - - - - MODIFIED SURF INDEX= 6.5		
NOTE: Surging breakers should occur on beaches with steep gradients and should not normally occur with spilling breakers.		

Los parámetros físicos presentes en la zona de rompientes han sido obtenidos por cada una de las herramientas numéricas utilizadas anteriormente. La metodología de cálculo empleada para cada parámetro se describe de la siguiente manera:

1. Altura de ola significativa H_s en rotura (ALFA): se aplica directamente la magnitud (en pies) obtenida por cada una de las herramientas numéricas.
2. Periodo en rotura (CHARLIE): el periodo en rotura se refiere al periodo medio, normalmente el mismo o cercano al periodo en aguas profundas. Se le aplica una modificación dada por tablas, Anejo 2.
3. Tipo de rotura (DELTA): se determina el tipo de rotura (*Spilling*, *Surging* y *Plunging*) calculando el número de Iribarren y se aplica una modificación dada por tablas, Anejo 2.
4. Angulo en rotura (ECHO): se determina el ángulo entre el oleaje y la costa y se aplica una modificación dada por tablas, Anejo 2.
5. Corriente litoral (FOXTROT): velocidad de la corriente (en nudos) causada por la rotura del oleaje. Se le aplica una modificación dada por tablas, Anejo 2.
6. Viento relativo (HOTEL): se determina la velocidad del viento y la dirección. Durante este trabajo el viento ha sido descartado del cálculo del MSI debido no haberse aplicado en las herramientas numéricas y a que el dominio es suficientemente pequeño para descartar acciones por viento.
7. Segunda ola en rotura (HOTEL-ALFA): ocasiones donde se encuentran grupos de oleajes acercándose a la playa de diferentes direcciones. En este caso no ha sido aplicado.

Ya obteniendo el índice de MSI se establece si la operatividad de un ejercicio de desembarco es favorable o desfavorable bajo las condiciones en la zona de rompientes predichas. Límites de valores de MSI para un desembarco favorable, marginal o desfavorable están relacionados al tipo de embarcación anfibia (Ver Tabla 13 y Figura 30).

Tabla 13. Límites del *Modified Surf Index* (MSI) para tipos de embarcaciones anfibas.

Tipo de embarcación	Favorable	Marginal	Desfavorable
LCM8	$MSI \leq 7$	$7 < MSI \leq 8$	$MSI > 8$
LASRC V	$MSI \leq 8$	$8 < MSI \leq 9$	$MSI > 9$
LCU	$MSI \leq 11$	$11 < MSI \leq 12$	$MSI > 12$
Pontoon	$MSI \leq 6$	$6 < MSI \leq 7$	$MSI > 7$



Figura 30. Ilustraciones de los tipos de embarcaciones anfibias en Tabla 6.

(Fuentes: en.wikipedia.org/wiki/Landing_Craft_Mechanized, www.pinterest.com/pin/485825878551854199/?lp=true, www.flickr.com/photos/navyinside/11340311695/, <http://en.people.cn>)

5.2. Resultados comparativos de MSI

En la siguiente sección se presentan los resultados de MSI obtenidos en la playa experimento Duck, Carolina del Norte bajo las condiciones de contorno descritas en el capítulo 5. Se emplean comparaciones de los índices MSI obtenidos utilizando mapas del dominio y datos en tres puntos de control. Por último, se presentan comentarios funcionales enfocados en el papel de cada uno de los parámetros en zona de rompientes en el resultado del *Modified Surf Index* (MSI).

Mapas de MSI

Las Figuras 31, 32 y 33 ilustran el resultado del índice MSI en el dominio completo de la zona de estudio correspondiendo a los casos 8,3 y 6, respectivamente. Las figuras son presentadas con un orden de menor energético trascendiéndose al más energético.

La Figura 31 refleja un estado de mar característicos de calma con valores de MSI mayormente menores a 4.5 permitiendo un ejercicio anfibio favorable. Se observan valores similares entre las tres herramientas, a distinción de pequeñas zonas de donde el índice es para XBeach y SWAN+SHORECIRC son levemente mayores.

Para un entorno caracterizado por un estado de mar medio se observan valores muy variables para las tres herramientas (Ver Figura 32). La herramienta XBeach provee índices mayores en relación con las otras dos herramientas. Se contemplan peculiares zonas de sombras con mayores valores de MSI, zonas que por su forma son correspondientes al flujo de corrientes en la playa.

Por último, se obtiene en la Figura 33 un estado de mar característico de tormenta con índices mayores a 6. Estos resultados hacen del entorno como uno no favorable a la hora de ejecutar un desembarco anfibio bajo las condiciones de contorno establecidas. Por otra parte, cercano a la costa la herramienta XBeach provee resultados de MSI cercanos a 8, mientras que las otras dos herramientas brindan resultados parcialmente más bajos.

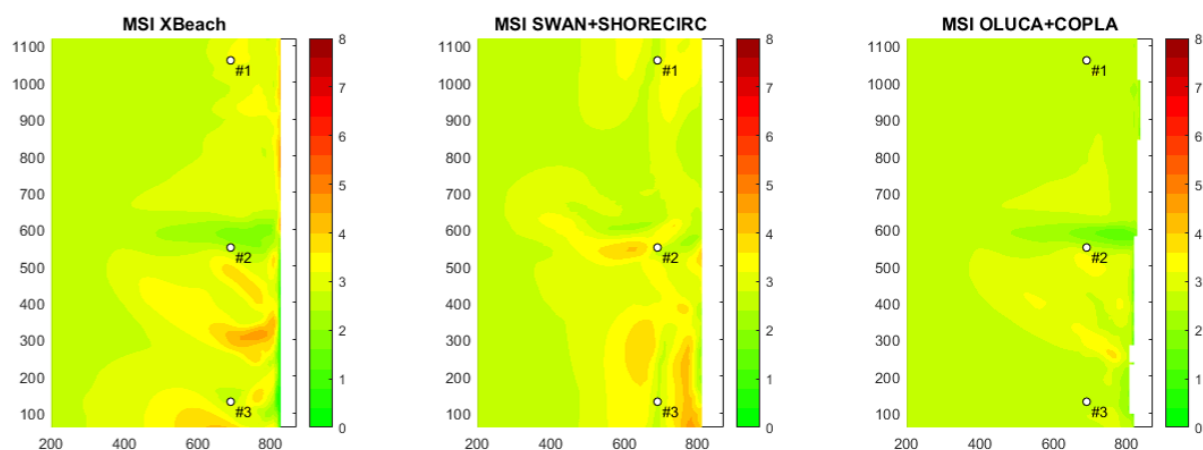


Figura 31. Mapas de MSI obtenidos para cada una de las herramientas numéricas referentes al Caso 8.

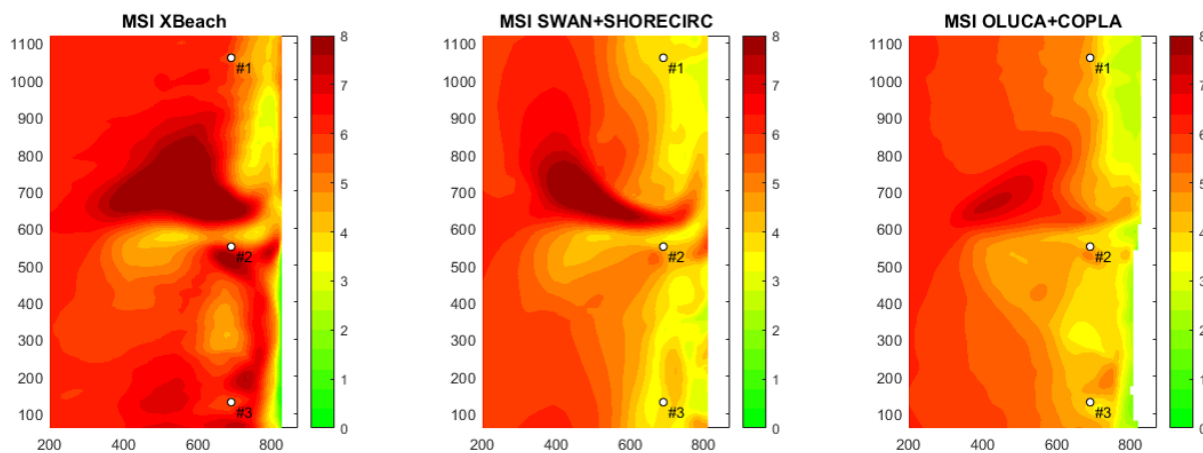


Figura 32. Mapas de MSI obtenidos para cada una de las herramientas numéricas referentes al Caso 3.

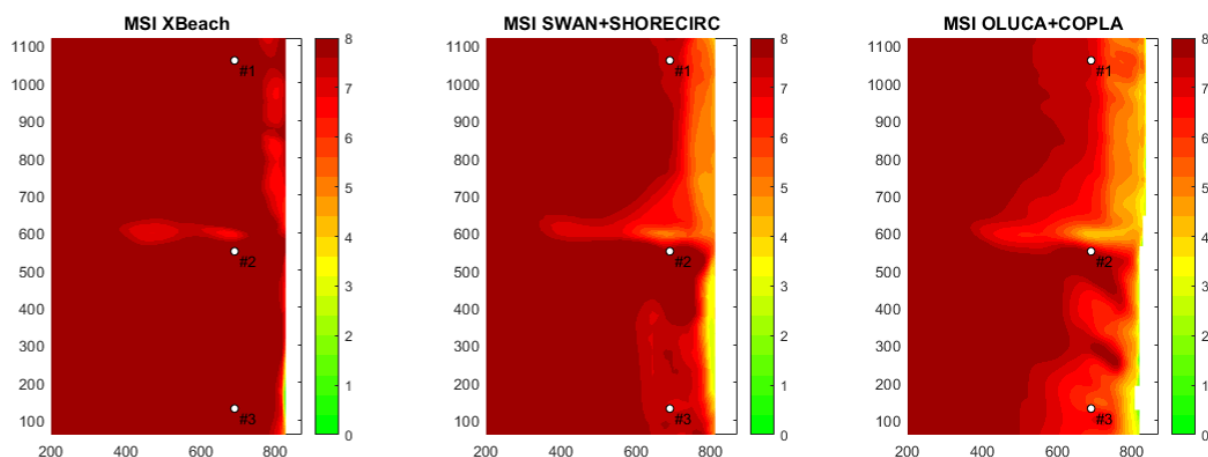


Figura 33. Mapas de MSI obtenidos para cada una de las herramientas numéricas referentes al Caso 9.

En los mapas anteriormente presentados se observan mayores valores de MSI bajo los parámetros físicos obtenidos por el modelo XBeach. En el capítulo 5 se obtuvieron resultados de altura de ola y corrientes variables entre las tres herramientas, variabilidad que no se refleja con significancia en los cálculos de MSI. En general, los resultados de MSI obtenidos con base a las 3 herramientas numéricas presentan valores máximos (zonas menos favorables) en las mismas zonas del dominio. Dicha observación permite estipular que hay una consistencia en la física de cada modelo.

Puntos de Control

Los tres puntos de control establecidos en las periferias de la zona de rompientes brindan información adicional acerca de la magnitud de los valores de entrada para cada parámetro en la zona de rompientes calculado. De esta forma, se emplea un análisis sobre el peso de cada uno de estos parámetros respecto valor MSI obtenido.

Las figuras 34, 35 y 36 muestran gráficos de los puntos de control para el Caso 3 ($H_s=2$ m, $T_p=7.7$, $Dir=257^\circ$) donde el parámetro de rompientes se encuentra en el eje de X y la magnitud de valor de entrada calculado se encuentra en el eje Y. Se observa como en cada punto de control todos los parámetros, unos más que otros, contribuyen a la obtención del índice MSI. Para los tres puntos de control se observa como los pesos del oleaje en rotura, el tipo de rotura y la corriente, respectivamente, juegan un papel importante en el valor final del MSI. Acorde a los resultados obtenidos en el capítulo 5 y los mapas de MSI ilustrados, la herramienta XBeach sostuvo los índices más altos en los tres puntos de control.

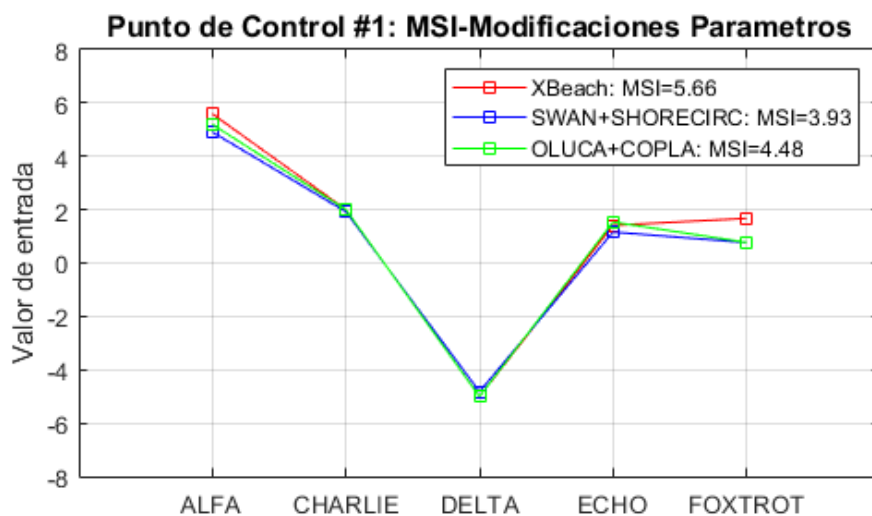


Figura 34. Valores de entrada para parámetros físicos en el punto de control #1.

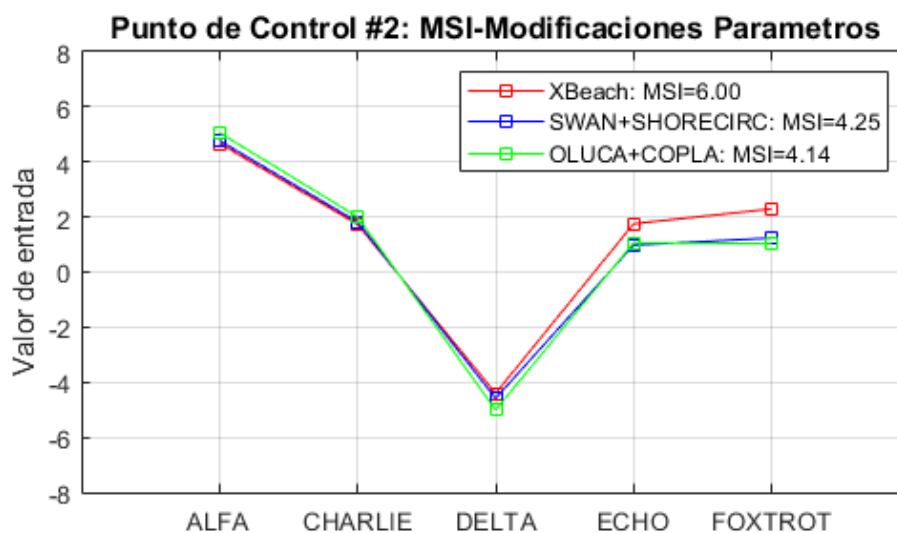


Figura 35. Valores de entrada para parámetros físicos en el punto de control #1.

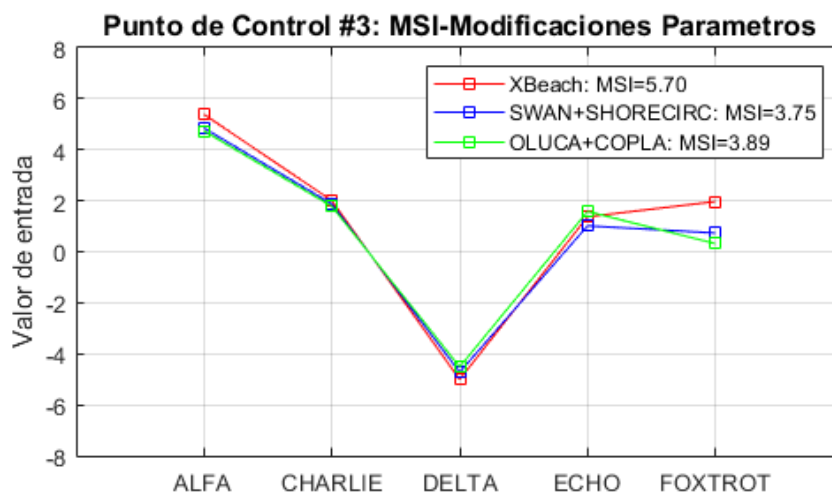


Figura 36. Valores de entrada para parámetros físicos en el punto de control #1.

De las figuras se observa que la magnitud de ALFA, altura de ola rompiente, domina en magnitud los otros parámetros. Por lo tanto, la altura de ola es el parámetro con mayor peso a la hora de determinar el índice MSI. De igual forma tipo de rotura (DELTA) sostiene magnitudes de importancia, que su cálculo dependen de la altura del oleaje.

Por otro lado, se observan mayores valores de MSI correspondientes a la herramienta OLUCA+COPLA que a la herramienta SWAN+SHORECIRC. Sosteniendo los resultados de estadísticos de cada modelo, OLUCA+COPLA con mayor bondad de ajuste para la variable de oleaje, se ratifica que la magnitud del oleaje aporta el mayor peso en el valor total del MSI.

Por consiguiente, se puede establecer que el parámetro más importante a la hora de establecer el criterio de desembarco MSI es la altura significativa del oleaje rompiente. No obstante, no se le quita importancia a la corriente cual su presencia aporta gran peso al valor relacionado por el oleaje.

Comentarios funcionales

Se ha encontrado que la magnitud de la altura de oleaje significativa en rotura es el parámetro con mayor peso en el cálculo del criterio de desembarco MSI. Es por esto, por lo que la precisión en la obtención de las magnitudes de oleaje en la zona de rompientes es de gran importancia a la hora de definir la operatividad de un ejercicio anfibio. A lo anteriormente mencionado se le añade la dependencia de H_s en las modificaciones de los parámetros: CHARLIE, DELTA y ECHO. Las tablas de modificaciones correspondientes a estos parámetros despenden de H_s en rotura, por lo tanto, las modificaciones dependerán de ALFA.

Con los análisis anteriormente empleados en el capítulo 5 y 6, se aplica una columna adicional a la común de cálculo de MSI, Tabla 12. Esta cuarta columna ha sido añadida con el fin de establecer comentarios funcionales respecto a la adecuación de la teoría a la realidad prevista en los análisis anteriores (Ver Tabla 14). En la tabla se presenta un calculo ejemplo utilizando como parámetros en zona de rompientes las predicciones del modelo XBeach para el caso representativo 3 ($H_s=2$ m, $T_p=7.7$, $Dir=257^\circ$) en el punto de control #2.

Tabla 14. Hoja o tabla de calcula incluyen comentarios funcionales obtenidos en el TFM

Parámetros <i>Surf Zone</i>	Modificación	Comentarios Funcionales	Valor de Entrada
Altura significativa rompiente (ALFA)	No modificación, entrar magnitud en pies.	La altura de ola tiene el mayor peso.	4.72
Periodo de oleaje rompiente (CHARLIE)	Utilizar modificación de tabla en Anejo 2.	No sufre gran variabilidad	1.77
Tipo de rotura (DELTA)	Utilizar modificación de tabla para rotura en <i>Spilling</i> y <i>Surging</i> .	Se encuentra acorde obteniendo gran peso.	-4.48
Angulo de rotura (ECHO)	Utilizar modificación de tabla en Anejo 2.	Parámetro que depende de ALFA	1.7
Corriente litoral (FOXTROT)	Utilizar modificación de tabla en Anejo 2.	Sostienen peso, pero no al nivel de ALFA	2.3
Viento (HOTEL)	Utilizar modificación de tabla en Anejo 2.	NO APLICADO	-
Total			MSI= 6 (Marginal)

6. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

6.1. Conclusiones

En este trabajo se ha logrado explorar el modelo XBeach como nueva estrategia numérica para la cuantificación final del índice MSI en costa. Se ha establecido el método adecuado de uso del modelo con el fin de simular los procesos de oleaje y corrientes de rotura en la zona de rompientes.

De igual forma, se ha comparado los procesos en la zona de rompientes obtenidos por XBeach con bases de datos instrumentales provenientes de una campaña de campo en la Playa Duck de Carolina del Norte. Herramientas de uso habitual en la literatura, SWAN+SHORECIRC y OLUCA+COPLA, se han aplicado, de igual forma, con el fin de establecer comparaciones entre las tres herramientas numéricas de cara a la predicción futura del desembarco anfibio militar.

Con base a las predicciones de altura de ola y corrientes litorales obtenidas por el modelo XBeach se dicta por efectiva la viabilidad del uso de esta para la evaluación temprana del desembarco anfibio en costa. Conclusiones basadas en la eficiencia, resultados y fiabilidad general de las tres herramientas numéricas en el cálculo del parámetro MSI han sido desarrolladas. Estas conclusiones se han subdividido en conclusiones de cara: a la aplicación de la herramienta, a las predicciones en zona de rompientes obtenidas y al cálculo final de MSI en costa.

Aplicación de las herramientas

- A diferencia de XBeach, las herramientas SWAN+SHORECIRC y OLUCA+COPLA cuentan con una interfaz que le permite al usuario, de forma rápida y ordenada, establecer el montaje numérico y ejecutar la herramienta.
- Referente a un estado de mar espectral, el tiempo computacional de OLUCA+COPLA esta en la escala de segundos mientras que para XBeach y SWAN+SHORECIRC se encuentra en los 3-5 minutos.

Predicciones por las herramientas

- En los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad el modelo XBeach aporta resultados más robustos de oleaje. Las magnitudes de las corrientes en comparación con las otras herramientas se reflejaron mayor bondad de ajuste con los datos instrumentales.
- XBeach demuestra ser más sensible a los cambios en fricción por fondo, particularmente en la altura de oleaje, que las otras dos herramientas.
- Los patrones de corrientes simulados por SHORECIRC representan un comportamiento físico más real y detallado en comparación con las otras dos modelos de corrientes.

Cálculo final del MSI

- La altura significativa en rotura sostiene el mayor peso a la hora de calcular el índice de desembarco anfibio considerándose como el parámetro crítico en la predicción futura del desembarco anfibio militar.
- La magnitud de las corrientes y sus patrones de flujo influyen en la zonificación de los valores de MSI a lo largo de la zona de estudio. De esta forma aportando peso en el valor final del MSI.

6.2. Futuras líneas de trabajo

La gran envergadura de las tres herramientas numéricas, los resultados obtenidos en este trabajo y la necesidad de continuar estudiando la evaluación temprana del desembarco anfibio han abierto las puertas a futuras líneas de trabajo e investigación. Algunas son aplicaciones que faltaron en este trabajo y otras son ideas nuevas que se establecieron a lo largo del estudio.

1. Ejecutar el registro de oleaje de todo el mes de diciembre del 2016.
2. Trabajar con una serie de datos comparativa más extensa. Se podría seleccionar una mayor cantidad de casos representativos por algún método estadístico (selección híbrida).
3. Aplicar las herramientas a otras playas experimento en la cual cambien las situaciones de contorno.
4. Explotar el potencial de la herramienta XBeach para incluir nuevos procesos físicos en el cálculo del criterio de desembarco Modified Surf Index (MSI).
5. Análisis de sensibilidad modificando el esquema numérico de rotura para cada una de las herramientas. Conseguir que el modelo numérico transforme el oleaje hasta rotura lo más parecido a la realidad. Para casos no estacionarios el modelo XBeach cuenta con tres formulaciones de rotura: Daly et. Al (2010), Roelvink (1993a) y Roelvink (1993a) extendida. En la Figura 37 se presentan los mapas de corrientes para las tres formulaciones remarcando variabilidad en el área de presencia de flujo debido a la rotura del oleaje. Añadir a la validación de este TFM las diferentes formulaciones de roturas mejorarían el estudio de viabilidad de XBeach como estrategia numérica para el cálculo del índice MSI.

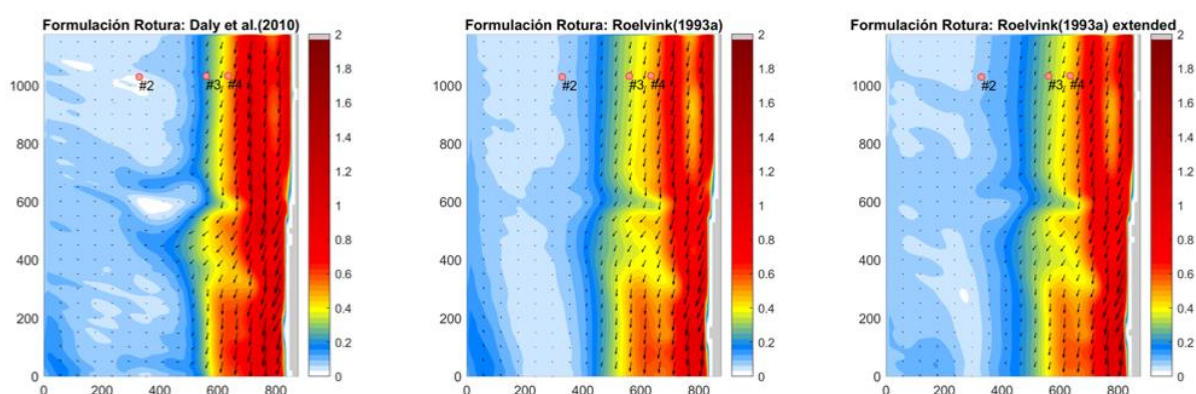


Figura 37. Mapas de corrientes para Caso 6 (Temporal) utilizando las formulaciones de rotura disponibles en XBeach.

7. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

Aerographer's Mate, Module 1-Surface Weather Observations. NAVEDTRA 14269

Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J.Geoph.Research, 104, C4, 7649-7666

Christie, G.,2006: TheSWANSURF Wave Model: Implementation and User Manual.DSTO-GD-0475, Maritime Operations Division, Defense Science and Technology Organization, Australia

Commander, Naval Surface Force, Pacific, and Commander, Naval Surface Force,Atlantic (1987) *Joint Surf Manual*, COMNAVSURFPAC/COMNAVSURFLANTINST 3840.1B, Washington.

Dykes, J.D., Y.L. Hsu, J.M. Kaihatu and R.A. Allard, 2005: Development of methodology and software for operational Delft3D applications, NRL Mem. Report (NRL/MR/7320-05-8832), 33pp

FRF (2004). Sandyduck '97 coastal field experiment. <http://www.frf.usace.army.mil/SandyDuck/SandyDuck.st>.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC). 2001. OLUCA-SP. Modelo de propagación de oleaje espectral, Manual de referencia Oluca-SP 3.0.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC). 2001. Copla-MC/SP. Modelo corrientes de rotura en playas, Manual de referencia Copla-MC/SP 3.0.

Haas, K. A., & Warner, J. C. (2009). Comparing a quasi-3D to a full 3D nearshore circulation model: SHORECIRC and ROMS. *Ocean Modelling*, 26(1–2), 91–103.

Infantería de Armada Española:<http://www.revistanaval.com>

Kirby, J.T. and H.T. Özkan (1994). "Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions. Ref/Dif s version 1.1. Documentation and user's manual, report No. CACR-94-04", Center Applied Coastal Research, University of Delaware.

Mettlach, T.R., Earle, M.D. and Hsu, Y.L. (2002), "Software design document for the navy standard surf model, version 3.2", Rep. Prepared for Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, Miss.

Nearshore currents. J. Mech. B/Fluids,83-101.

Putrevu, U. and I. A. Svendsen, 1999, Three-dimensional dispersion of momentum in wave-induced

Roelvink, J. A. (1993). Dissipation in Random Wave Groups Incident on a Beach. *Coastal Engineering*, 19, 127-150.

Roelvink, J. A., Reniers, A. J. H. M., van Dongeren, A. R., van Tiel de Vries, A. R., Lescinski, J. S. M., and McCall, R. T. (2010). Xbeach model description and manual. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., and Junior, A. H. S. (2005). Empirical parameterization of setup, swash and runup. *Coastal Engineering*, 53:573–588.

The SWAN Team (2014) SWAN Technical Documentation Version 41.01. Environmental Fluid Mechanics Section, Delft University of Technology.

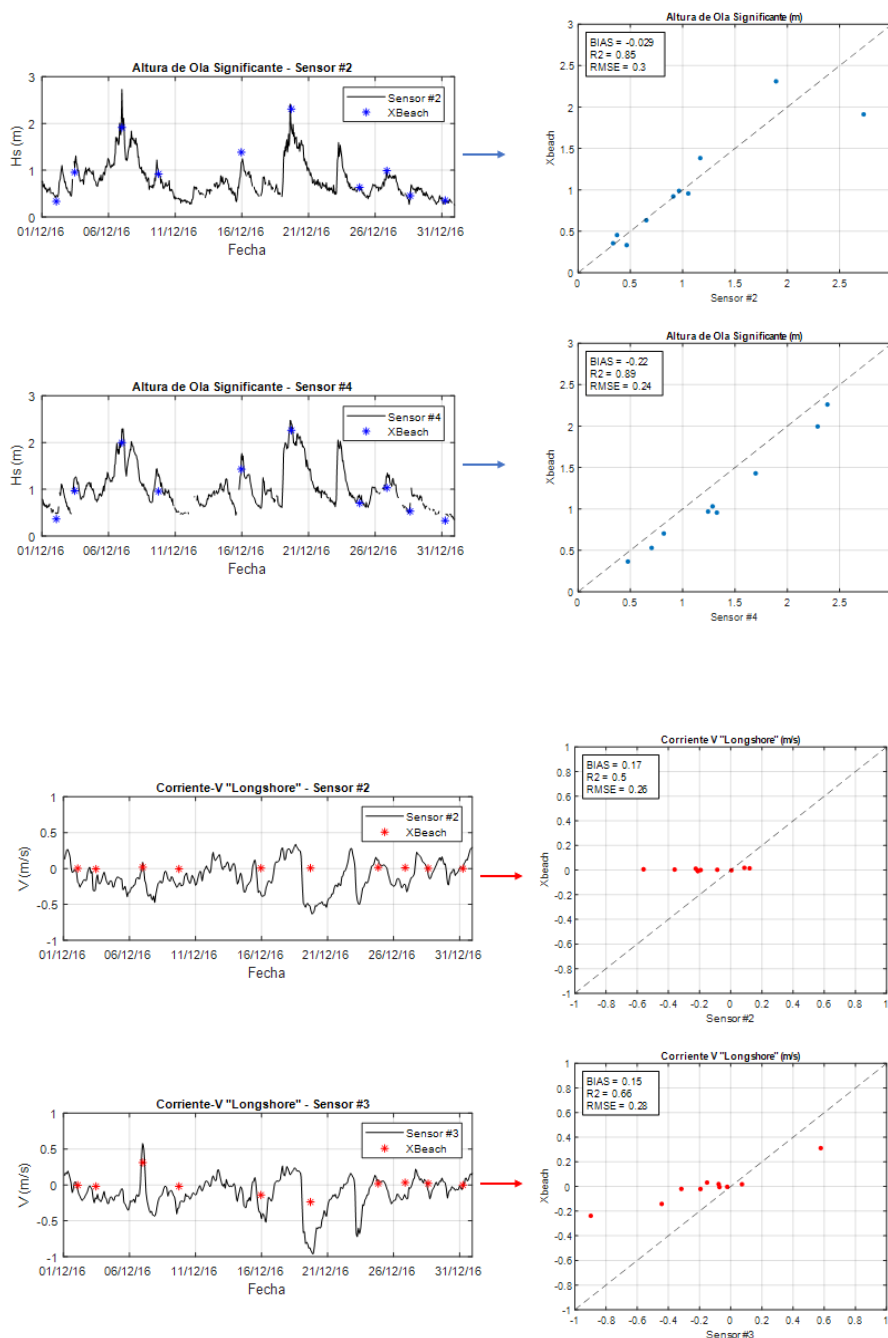
8. ANEJO

Se presenta información adicional que ha sido resumida y referenciada en los anteriores capítulos del Trabajo de Fin de Máster.

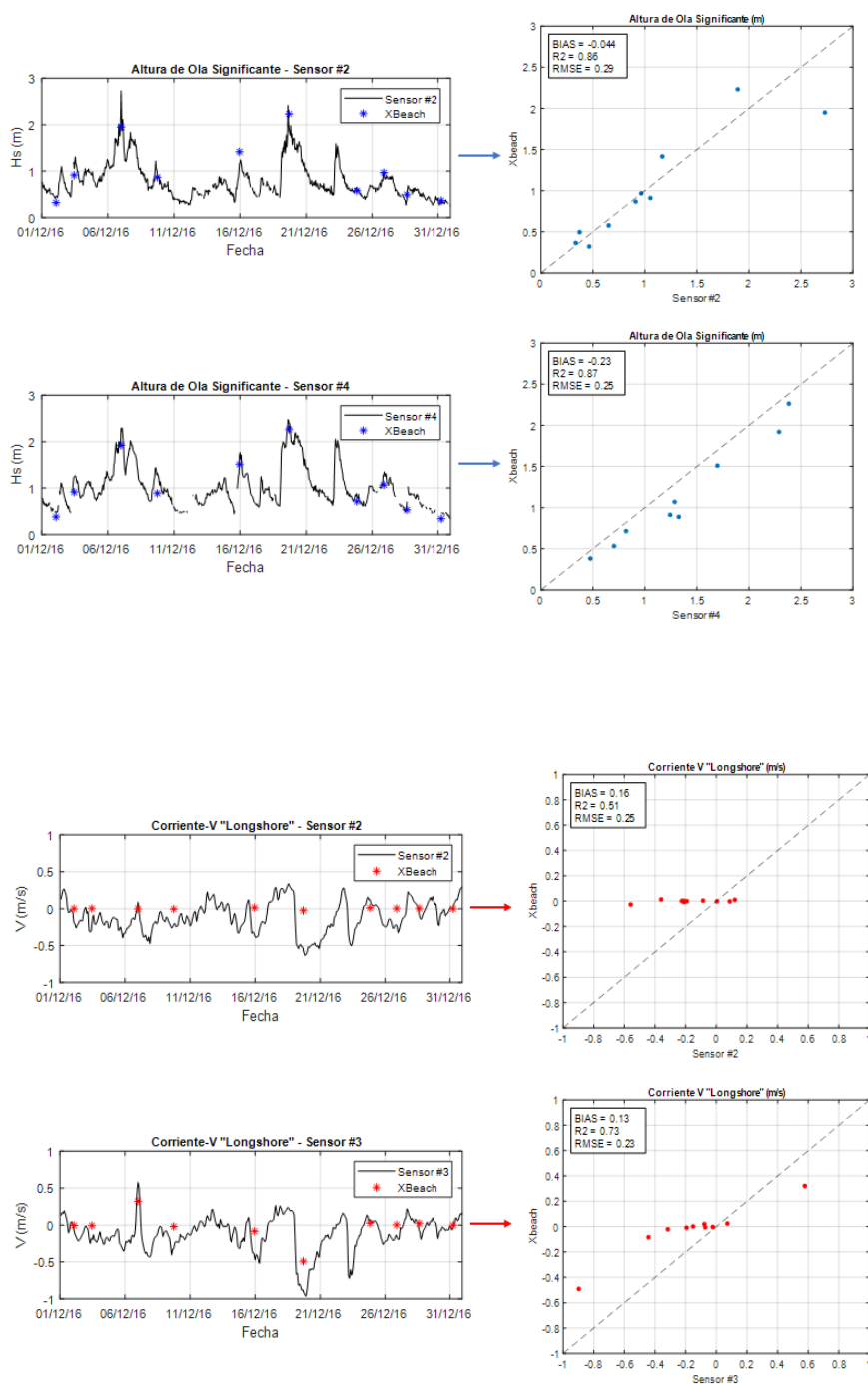
8.1. ANEJO 1

8.1.1. Resultados de la herramienta XBeach

$C=65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$

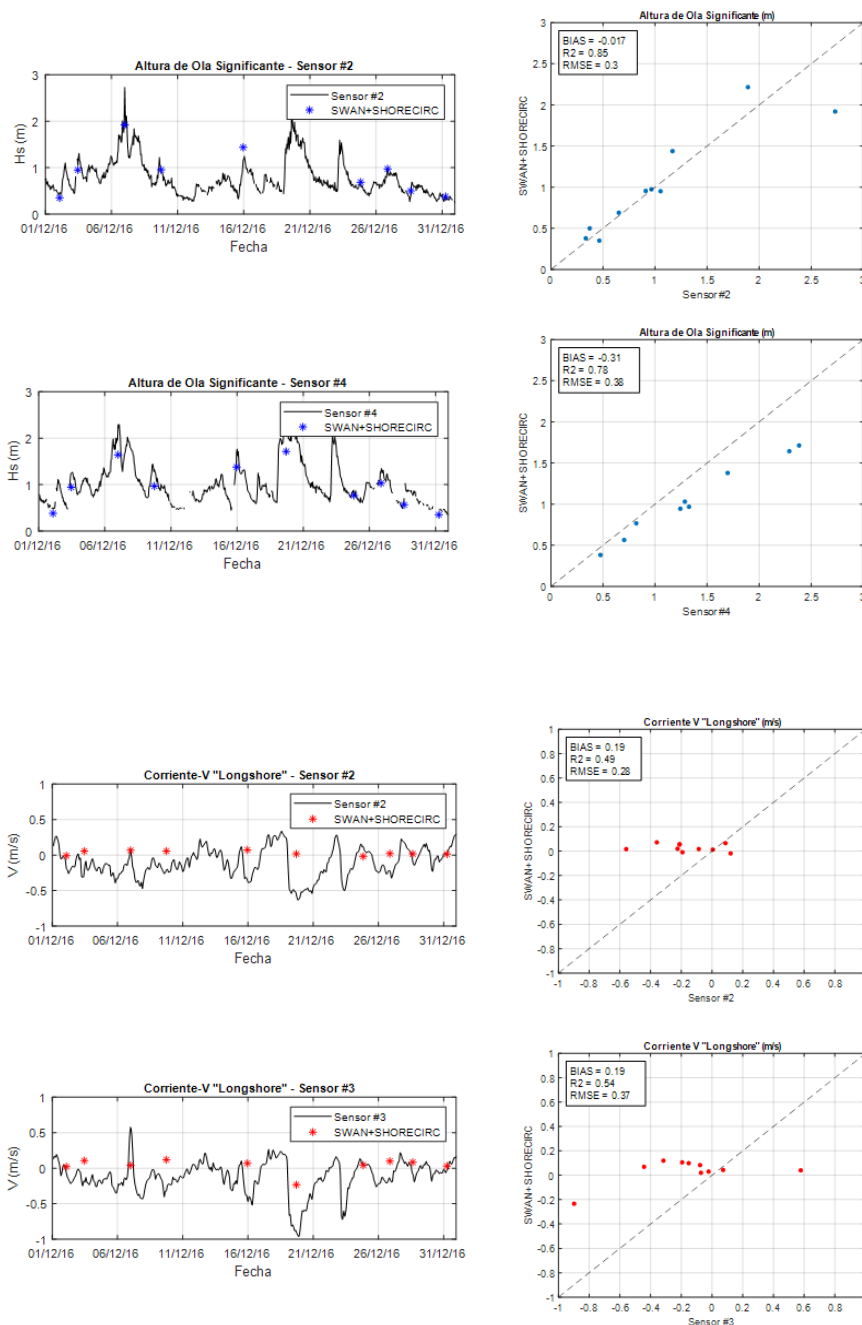


$$C=70 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

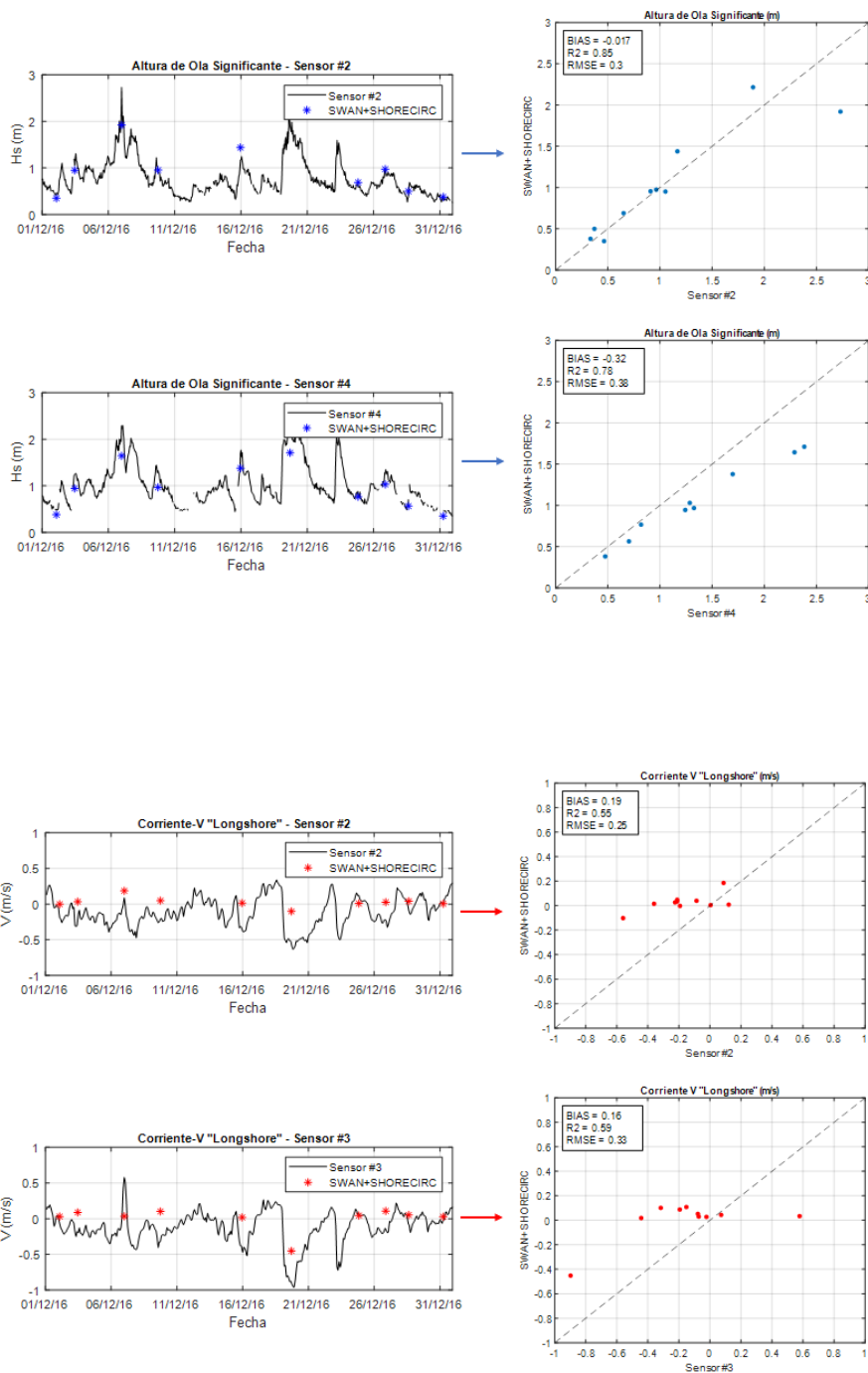


8.1.2. Resultados de la herramienta SWAN+OLUCA

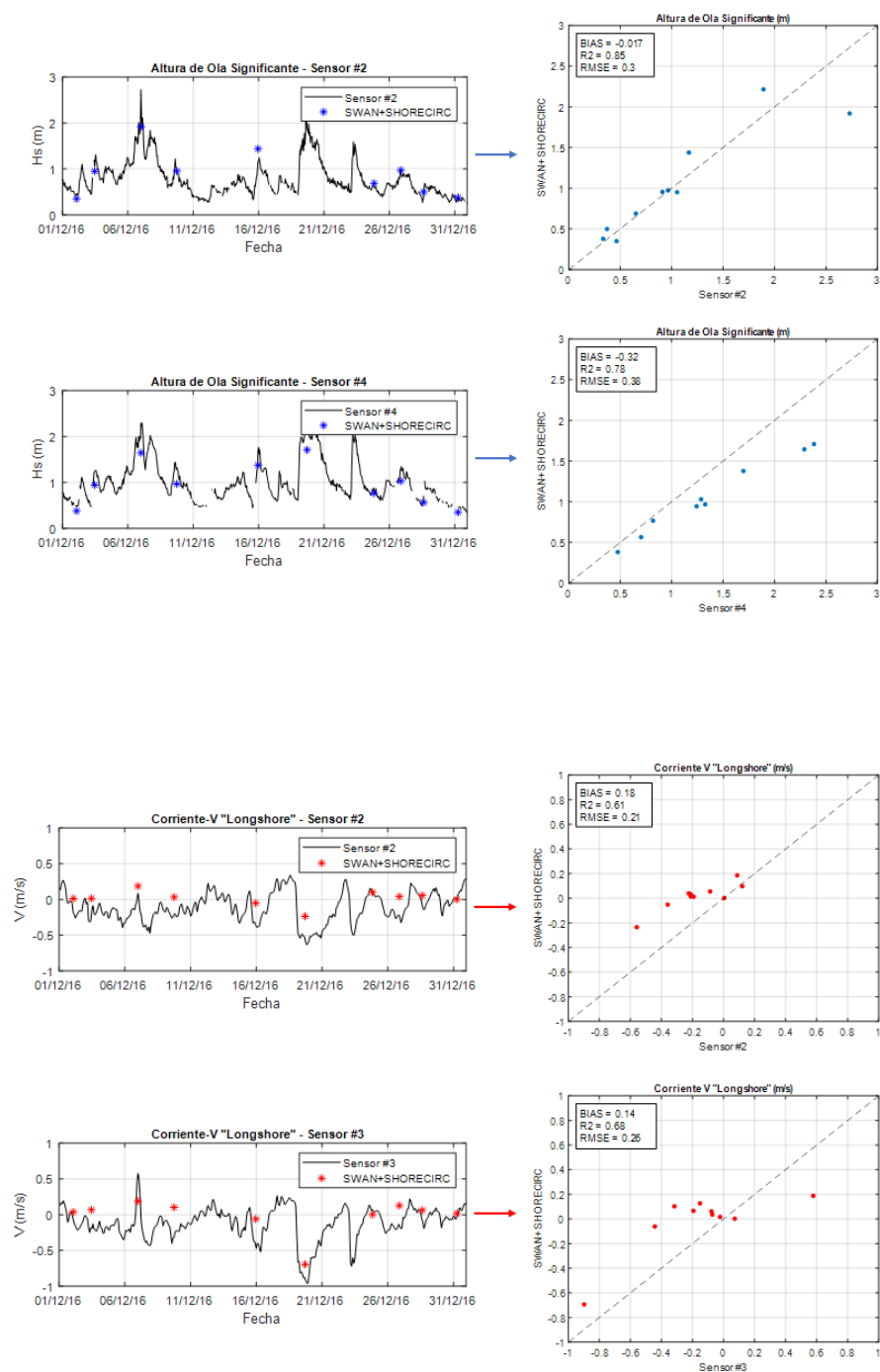
$C_d=0.015$



$C_d=0.008$

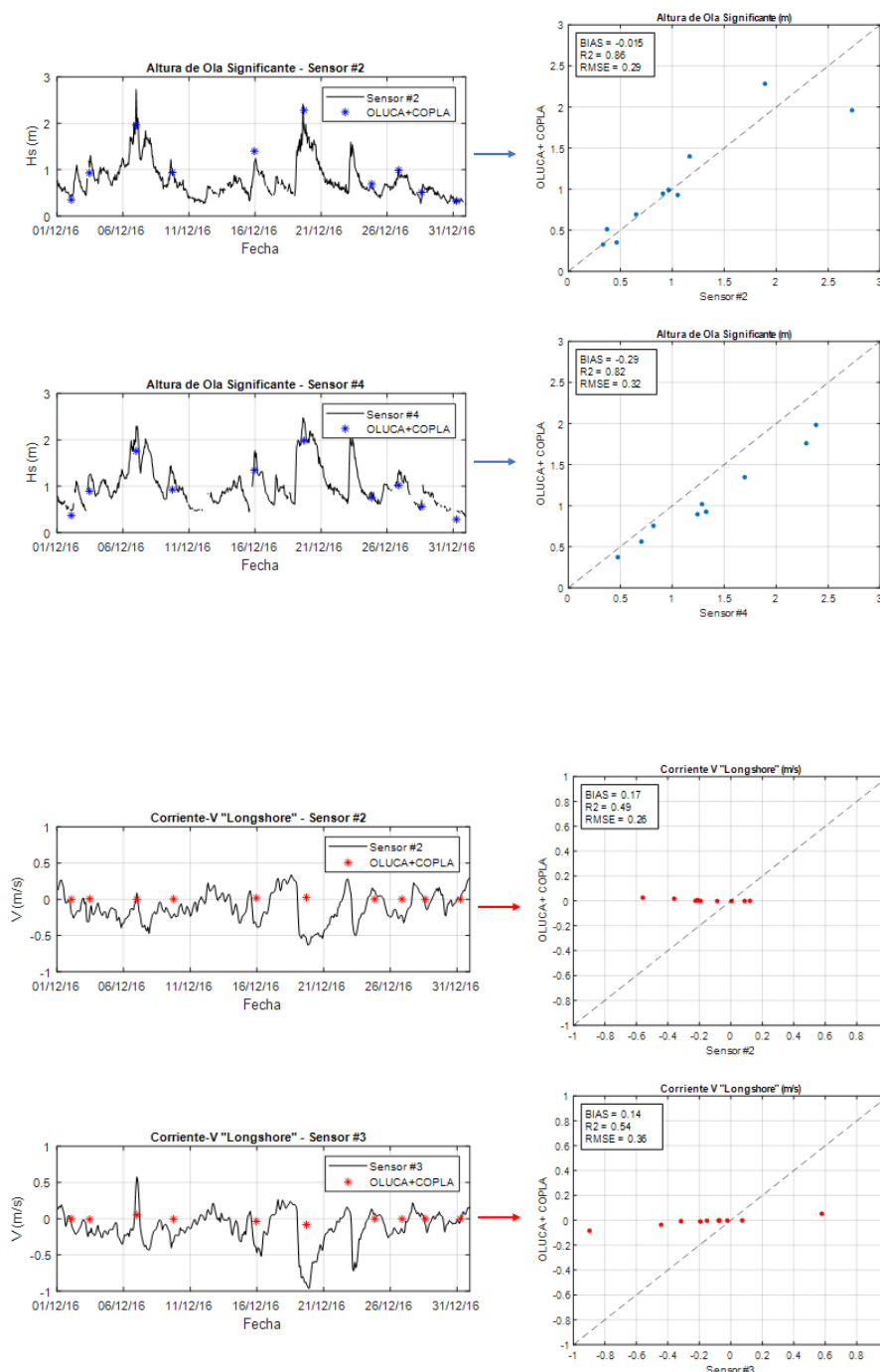


$C_d=0.005$

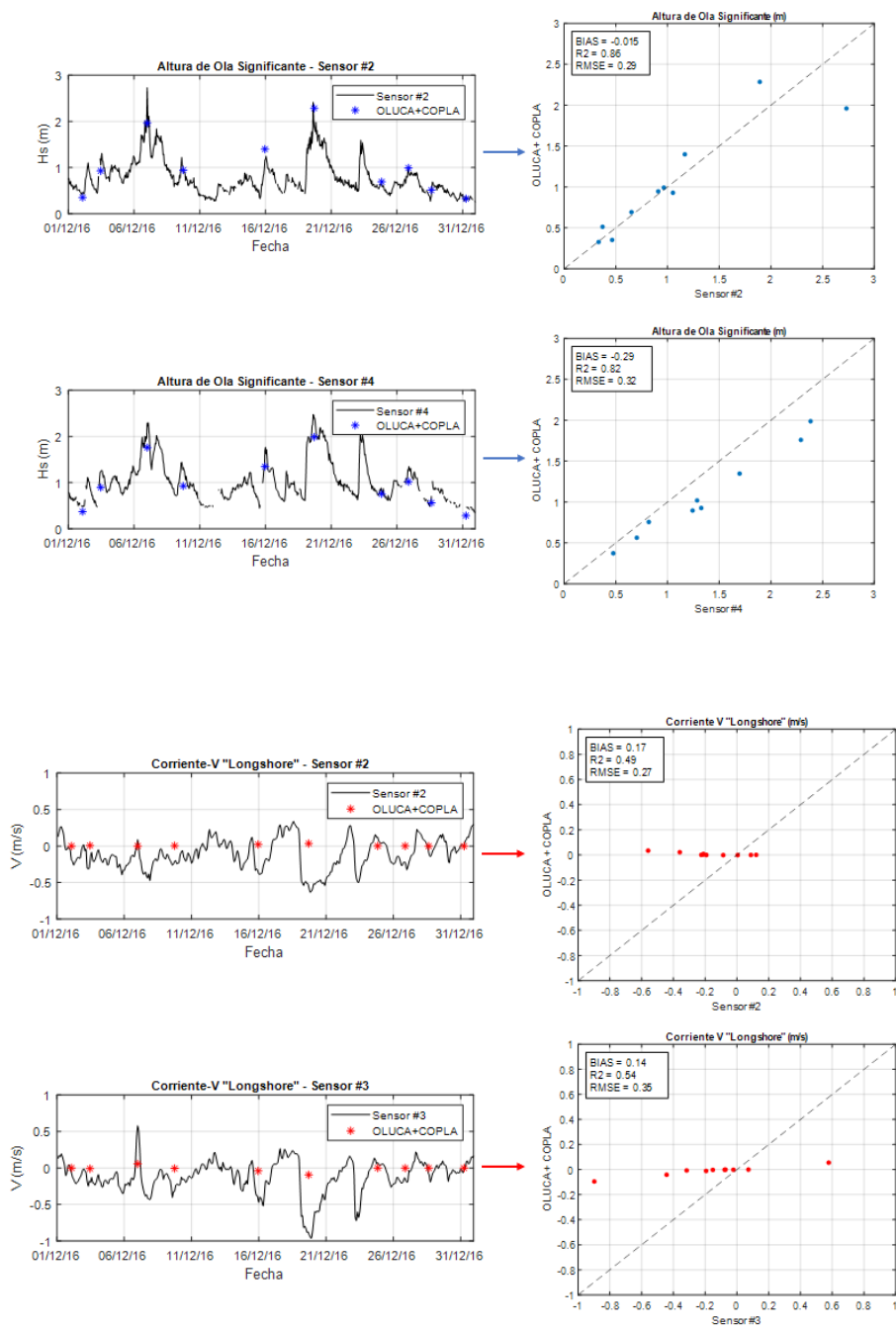


8.1.3. Resultados de la herramienta OLUCA+COPLA

K_{swc}=0.5 m



$K_{swc}=0.1\text{ m}$



8.2. ANEJO 2

8.2.1. Tablas de cálculo del MSI

MODIFIED SURF INDEX CALCULATION

LEARNING OBJECTIVES: Describe the procedures used to calculate the Modified Surf Index (MSI). Identify features of the SURF program available in TESS/MOSS.

The modified surf index (MSI) is the most critical parameter in a waterborne assault. Both the SUROB observer and weather personnel aboard the task force command ship normally calculate the MSI from information contained in a SUROB. Additionally, surf forecasters at a center, facility, or detachment routinely

calculate the modified surf index as part of the surf forecast.

The modified surf index is a calculated, single dimensionless number used as an objective decision aid. It is an assessment of the combined effects of breakers, littoral current, and wind conditions on landing craft. If the MSI exceeds the MSI limit for a particular craft, the landing is not feasible with that type of craft without increasing the casualty rate. The modified surf index is calculated on a locally reproduced Modified Surf Index Calculation Worksheet, shown as table 4-1. Tables 4-2 through 4-6 are used in computing table 4-1.

Table 4-1.—Modified Surf Index Calculation Worksheet

SUROB / SURFCAST NO. 5: VALID TIME: 2200Z - RED BEACH		
SURF REPORT ITEM	MODIFICATION	ENTRY
SIG BREAKER HT (ALFA) 4.5 FT	No modification, enter significant breaker height.	+4.5
BREAKER PERIOD (CHARLIE) 7 SEC	Enter value from breaker period modification table (table 4-2).	+1.6
BREAKER TYPE (DELTA) 70% SPILLING 30% PLUNGING 0% SURGING (see note below)	NO ENTRY FOR 100% PLUNGING SURF. Enter only a value for the percent spilling surf or the percent surging surf from the breaker type modification tables (table 4-3).	-2.8
BREAKER ANGLE (ECHO) 15 DEG	Enter modification value from the breaker angle modification table (table 4-4) as value (A)= 2.4.	Enter only greater value, (A) or (B) +2.7
LITTORAL CURRENT (FOXTROT) 0.9 KT	Enter modification value from the littoral current modification table (table 4-5) as value (B)= 2.7	
RELATIVE WIND (HOTEL) 15 kt at 35 DEG ONSHORE	Enter the value from the wind modification table (table 4-6).	+0.5
SECONDARY SIG BREAKER No HT (HOTEL-ALFA) OFT	No modification, enter secondary significant breaker height.	0
(add all entries) - - - MODIFIED SURF INDEX= 6.5		
NOTE: Surging breakers should occur on beaches with steep gradients and should not normally occur with spilling breakers.		

Table 4-2.—Breaker Period Modification

BREAKER PERIOD MODIFICATION											
MODIFICATION ENTRY											
P E R I O D	≥ 17	0	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-8	-10
	16	0	0	-1	-1	-2	-2	-3	-4	-5	-7
	15	0	0	0	-1	-1	-1	-2	-2	-3	-3
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	+1	+1	+1	+2	+2	+3	+3
	12	0	0	+1	+1	+2	+2	+3	+4	+5	+7
	11	0	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+8	+10
	10	0	+1	+1	+2	+3	+5	+7	+9	+11	+13
	9	0	+1	+1	+3	+3	+6	+8	+11	+13	+17
	≤ 8	0	+1	+2	+3	+5	+7	+10	+13	+16	+20
		.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	≥ 5
SIGNIFICANT BREAKER HEIGHT (FT)											

Table 4-3.—Breaker Type Modification

BREAKER TYPE MODIFICATION											
MODIFICATION VALUE (A)											
%	100	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-10	
	90	0	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-10	
S	80	0	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-10	
P	70	0	-1	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-10	
I	60	0	-1	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-10	
L	50	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-10	
L	40	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-10	
I	30	0	-1	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-10	
N	20	0	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-10	
G	10	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-3	-5	
		.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
SIGNIFICANT BREAKER HEIGHT (FT)											
MODIFICATION VALUE (B)											
%	100	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+10	
	90	0	+2	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	
S	80	0	+2	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	
U	70	0	+2	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	
R	60	0	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+10	
G	50	0	+1	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+10	
I	40	0	+1	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+10	
N	30	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+10	
G	20	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+10	
	10	0	+1	+1	+3	+4	+5	+6	+7	+10	
		.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
SIGNIFICANT BREAKER HEIGHT (FT)											

Table 4-4.—Breaker Angle Modification

BREAKER ANGLE MODIFICATION											
BREAKER ANGLE MODIFICATION VALUE											
A	40	+0.1	.3	.7	1.3	2.0	2.9	3.9	5.1	6.5	8.0
N	35	.1	.3	.6	1.1	1.8	2.5	3.4	4.5	5.7	7.0
G	30	.1	.2	.5	1.0	1.5	2.2	2.9	3.8	4.9	6.0
L	25	.1	.2	.5	.8	1.3	1.8	2.5	3.2	4.1	5.0
E	20	0	.2	.4	.6	1.0	1.4	2.0	2.6	3.2	4.0
	15	0	.1	.3	.5	.8	1.1	1.5	1.9	2.4	3.0
D	10	0	-.1	.2	.3	.5	.7	1.0	1.3	1.6	2.0
E	5	0	0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.8	1.0
G											
		.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	25
SIGNIFICANT BREAKER HEIGHT (FT)											

Table 4-5.—Littoral Current Modification

CURRENT (knots)	MODIFICATION	CURRENT (knots)	MODIFICATION
0.1	0.3	1.7	5.1
0.2	0.6	1.8	5.4
0.3	0.9	1.9	5.7
0.4	1.2	2.0	6.0
0.5	1.5	2.1	6.3
0.6	1.8	2.2	6.6
0.7	2.1	2.3	6.9
0.8	2.4	2.4	7.2
0.9	2.7	2.5	7.5
1.0	3.0	2.6	7.8
1.1	3.3	2.7	8.1
1.2	3.6	2.8	8.4
1.3	3.9	2.9	8.7
1.4	4.2	3.0	9.0
1.5	4.5		